

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

**DOCTORADO EN INGENIERÍA Y PRODUCCIÓN  
INDUSTRIAL**

**ESCUELA DE DOCTORADO**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

**TESIS DOCTORAL**

**“MARCO DE REFERENCIA PARA EL  
DESARROLLO INTEGRADO DE MODELOS DE  
PROCESOS Y MATEMÁTICOS DE AYUDA A  
LA TOMA DE DECISIONES EN UN CONTEXTO  
DE LOGÍSTICA INVERSA”**

**Autor:**

D. Pascual Cortés Pellicer

**Tutor:**

Dr. Faustino Alarcón Valero

**València, Noviembre de 2020**



## **Agradecimientos:**

*“Al andar se hace camino  
Y al volver la vista atrás  
Se ve la senda que nunca  
Se ha de volver a pisar  
Caminante no hay camino, se hace camino al andar”  
JM Serrat*

Nadie dijo que embarcarse en un doctorado con casi cuarenta años fuese fácil y, de hecho, puedo afirmar que no lo es. Cuando eres profesor asociado, las clases, exámenes, reuniones y demás quehaceres te ocupan gran parte de tu tiempo, al que, has de añadirle el tiempo de tu “trabajo principal”, en mi caso, mis dos soles y mi pareja, a parte de mi empresa.

Por ello, mi primer y principal agradecimiento va destinado a ella, a mi compañera de viaje, por hacerme costado en todo momento. Gracias Ana.

A mis hijas, Vera y Carme, que han ido creciendo, viendo como su padre les tenía que ir robando tiempo día a día para poder acabar la tesis (tiempo que les iré devolviendo poco a poco).

A mi cuñada Mónica por su incesante interés en mi tesis y al resto de mi familia política por su incansable apoyo moral.

Y a mi familia, por todo su apoyo incondicional a lo largo de estos años.

Un especial agradecimiento se merece Faustino, mi tutor, mi maestro, mi amigo. Por toda su ayuda y su dedicación en todo este tiempo, por creer en mí y confiarme un tema tan apasionante como la Logística Inversa. Si hace quince años, como tutor de mi PFC, le agradecí que me permitiera ver en él aquella vocación que siempre me gustaría cumplir, hoy le puedo agradecer que esa vocación esté prácticamente cumplida. Mil gracias.

Otro especial agradecimiento es para Ángel, que de una forma u otra me ha permitido abrir y cerrar el largo camino de esta tesis.

Y a otros tantos compañeros del departamento que me han ayudado, mucho más de lo que piensan, con sus sabios consejos y experiencia, así como alguna ayuda puntual. Compañeros como David, Manolo, Julien, Raúl Poler, Raúl Oltra, Andrés, Llanos, Carlos, Cristóbal y Guillermina, muchas gracias.



## RESUMEN

El impacto negativo del hombre sobre el medio ambiente, el agotamiento de los recursos y las desigualdades sociales, son aspectos clave que han impulsado durante los últimos años la concienciación sobre la importancia de la sostenibilidad en los negocios. Una vía para conseguir un cambio de modelo de negocio hacia modelos más sostenibles es transformar el modelo empresarial tradicional lineal hacia modelos más circulares, priorizando el aprovechamiento de los recursos y la reducción del consumo de materias primas. De hecho, uno de los diecisiete *Objetivos de Desarrollo Sostenible*, establecidos en la agenda 2030 de Naciones Unidas, hace referencia a la producción y al consumo responsables, incluyendo, como una de sus metas, “**reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización**”. En este contexto de expansión del concepto de desarrollo sostenible y de la economía circular, la gestión de los productos recuperados ha convertido la Logística Inversa (LI) en una competencia clave de las Cadenas de Suministro (CdS) modernas.

Otra de las causas que sitúan a la LI en la primera línea de las preocupaciones de las empresas son las devoluciones de los productos adquiridos y el elevado flujo inverso que generan, debido al incremento exponencial del comercio electrónico y su permisiva política de devoluciones. Ante este vertiginoso crecimiento de las operaciones de LI, surge la necesidad de actualizar los tradicionales procesos logísticos de las empresas, integrando en ellos el Proceso de Logística Inversa (PLI), lo cual permite controlar todo el ciclo de vida del producto.

Sin embargo, debido fundamentalmente a que los flujos inversos son menos predecibles y más variables que los directos, la gestión de la LI no es una tarea fácil. En este contexto, muchas empresas han comenzado a trabajar duramente por estandarizar y formalizar sus PLI, estableciendo una serie de reglas, procedimientos y comunicaciones, que faciliten la comprensión del proceso a todos los interesados y les ayude a saber cómo actuar en cada momento. Disponer de un PLI estandarizado y formalizado permite una mejor comprensión y gestión de los productos devueltos o recuperados y una LI más eficiente, que puede a su vez proporcionar una ventaja competitiva a la empresa.

Otro aspecto vital para conseguir una mayor eficiencia y rentabilidad de los PLI es facilitar la toma de decisiones en dicho proceso. La identificación, estudio, descripción y modelado de las decisiones ayudará a los gestores o decisores a tener una visión integrada

de las mismas y a entender mejor los aspectos a considerar en dichas decisiones y su impacto. En definitiva, una toma de decisiones ágil y acertada aumentará la eficiencia, permitiendo reducir costes, mejorar el servicio al cliente e incrementar los beneficios de la compañía.

En este sentido, de entre todas las decisiones relacionadas con el PLI, la decisión sobre la alternativa de disposición (DD) puede destacarse como la más determinante, debido a que debe ser única para cada producto, condiciona al resto de decisiones, está influenciada por una elevada incertidumbre, repercute en el grado de sostenibilidad de la empresa, está condicionada por muchos factores y generalmente precisa de agilidad y rapidez para proporcionar una respuesta al cliente.

Precisamente, la importancia del PLI y la complejidad de la DD en el contexto descrito, justifican el desarrollo de herramientas de ayuda a la toma de decisiones. Sin embargo, los trabajos hallados en la literatura, si bien se centran en aportar modelos de ayuda a la toma de decisiones, no trabajan el PLI en su conjunto, y no llegan a estandarizar las operaciones que se realizan a lo largo del proceso, sin mostrar claramente cómo se construyen dichos modelos ni la composición de los distintos elementos del modelo.

La presente tesis desarrolla un **Marco de Referencia para el Desarrollo Integrado de Modelos de Procesos y Matemáticos en un contexto de LI (MR-DIMPM-LI)**, aportando una solución integrada que aborde el PLI en su conjunto y facilite la formalización del proceso y la toma de decisiones eficiente y sostenible en cada caso concreto. Mediante el Marco de Referencia planteado se promueve el desarrollo de modelos sostenibles, no solo favoreciendo el entendimiento y la incorporación del PLI en las empresas sino, además, haciendo que este sea realmente sostenible.

Este Marco de Referencia se ha aplicado a dos ejemplos reales con redes de LI diferentes. Por un lado, una red de LI de bucle cerrado en la que el mismo fabricante de sillones de relax se encarga de su PLI y, por otro lado, una red de LI de bucle abierto en la que profesionales de LI tratan con neumáticos usados para darles una nueva salida. Como resultado de estas aplicaciones, se ha podido comprobar la idoneidad del Marco de Referencia propuesto en cuanto a la formalización del PLI y a la toma de decisiones de la DD, haciéndola más eficiente y sostenible.

## ABSTRACT

The negative impact of human beings on the environment, the resources depletion and the social inequalities, are key aspects that have recently driven awareness of the importance of business sustainability. One way to achieve a change in the business model towards more sustainable ones is to transform the traditional linear business models to more circular ones, prioritizing the use of resources and reducing the consumption of raw materials. In fact, one of the seventeen *Sustainable Development Goals*, established in the United Nations 2030 agenda, refers to responsible production and consumption, including, as one of its goals, “**considerably reduce the generation of waste through prevention, reduction, recycling and reuse activities**”. In this context of expanding the sustainable development and the circular economy concepts, recovered product’s management has made Reverse Logistics (RL) a key competence of modern Supply Chains (SC).

Another reason why RL is a major concern for companies is the returns of purchased products and the high reverse flow generated, due to the exponential e-commerce increase and its permissive return policy. Because of this vertiginous growth of RL operations, the companies must update the traditional logistics processes, integrating the Reverse Logistics Process (RLP) into them, which allows controlling the entire life cycle of the product.

However, RL management is not an easy task, mainly because reverse flows are less predictable and more variable than direct ones. In this context, many companies have begun to work hard to standardize and formalize their RLP, establishing a set of rules, procedures and communications, which facilitate the understanding of the process for all interested stakeholders and help them to know how to act at any time. Having a standardized and formalized RLP enables better understanding and management of returned or recovered products and a more efficient RL, which can in turn provide a competitive advantage to the company.

Another vital aspect to achieve greater efficiency and profitability of the RLP is to facilitate decision making in this process. The identification, study, description and modeling of decisions will help managers or decision-makers to have an integrated vision of them and to better understand the aspects to be considered in such decisions and their

impact. In fact, agile and accurate decision making will increase efficiency, reducing costs, improving customer service and increasing company profits.

In this sense, among all the decisions related to the RLP, the disposition decision (DD) can be highlighted as the most decisive, since it must be unique for each product, it determines the rest of the decisions, it is influenced by high uncertainty and affects the degree of sustainability of the company, it is conditioned by multiple factors and generally requires agility and speed to respond to the customer.

Precisely, the importance of RLP and the complexity of DD in the context described, justify the development of tools as an aid to decision-making. However, the studies found in the literature, although they focus on providing models for decision-making, do not work on the PLI as a whole, and do not come to standardize the operations carried out throughout the process, hardly showing how these models are built or the composition of the different elements of the model.

This thesis develops a **Reference Framework for the Integrated Development of Mathematical and Process Models in an RL context (RF-IDMPM-RL)**, providing an integrated solution that addresses the RLP as a whole and facilitates the formalization of the process and the efficient and sustainable decision making in each specific case. Through the proposed Reference Framework, the development of sustainable models is promoted, not only favoring the understanding and incorporation of the RLP in companies but also making it truly sustainable.

This framework has been applied to two real examples with different RL networks. On the one hand, a closed-loop RL network in which the same manufacturer of relaxing chairs takes charge of its RLP and, on the other hand, an open-circuit RL network in which the RL professionals take charge of used tires to give them new uses. As a result of these applications, it has been possible to verify the suitability of the proposed Reference Framework regarding the formalization of the RLP and the decision-making of the DD, making it more efficient and sustainable.



## RESUM

L'impacte negatiu de l'home sobre el medi ambient, l'esgotament dels recursos i les desigualtats socials, són aspectes clau que han impulsat durant els últims anys la conscienciació sobre la importància de la sostenibilitat en els negocis. Una via per aconseguir un canvi de model de negoci cap a models més sostenibles és transformar el model empresarial tradicional lineal cap a models més circulars, prioritzant l'aprofitament dels recursos i la reducció del consum de matèries primeres. De fet, un dels disset *Objectius de Desenvolupament Sostenible*, que estableix l'agenda 2030 de Nacions Unides, fa referència a la producció i al consum responsables, incloent-hi, com un dels seus objectius, **"reduir considerablement la generació de residus mitjançant activitats de prevenció, reducció, reciclatge i reutilització"**. En aquest context d'expansió del concepte de desenvolupament sostenible i de l'economia circular, la gestió dels productes recuperats ha convertit la Logística Inversa (LI) en una competència clau de les Cadenes de Subministrament (CdS) modernes.

Una altra de les causes que situen la LI en la primera línia de les preocupacions de les empreses són les devolucions dels productes adquirits i l'elevat flux invers que generen, a causa de l'increment exponencial del comerç electrònic i la seua permissiva política de devolucions. Davant d'aquest vertiginós creixement de les operacions de LI, sorgeix la necessitat d'actualitzar els tradicionals processos logístics de les empreses, integrant en ells el Procés de Logística Inversa (PLI), la qual cosa permet controlar tot el cicle de vida del producte.

Tanmateix, a causa del fet que els fluxos inversos són menys predictibles i més variables que els directes, la gestió de la LI no és una tasca fàcil. En aquest context, moltes empreses han començat a treballar durament per estandarditzar i formalitzar els seus PLI, establint una sèrie de regles, procediments i comunicacions, que faciliten la comprensió del procés a tots els interessats i els ajude a saber com actuar en cada moment. Així doncs, disposar d'un PLI estandarditzat i formalitzat permet una millor comprensió i gestió dels productes retornats o recuperats i una LI més eficient, que pot al mateix temps, proporcionar un avantatge competitiu a l'empresa.

Un altre aspecte vital per tal d'aconseguir una major eficiència i rendibilitat dels PLI és facilitar la presa de decisions en aquest procés. La identificació, estudi, descripció i modelatge de les decisions ajudarà els gestors o decisors a tenir una visió integrada de les

mateixes i a entendre millor els aspectes a considerar en aquestes decisions i el seu impacte. En definitiva, una presa de decisions àgil i encertada augmentarà l'eficiència, permetent reduir costos, millorar el servei al client i incrementar els beneficis de la companyia.

En aquest sentit, d'entre totes les decisions relacionades amb el PLI, la decisió sobre l'alternativa de disposició (DD) pot destacar-se com la més determinant, pel fet que ha de ser única per cada producte, condiona a la resta de decisions, està influenciada per una elevada incertesa, repercuteix en el grau de sostenibilitat de l'empresa, està condicionada per molts factors la condicionen i generalment precisa d'agilitat i rapidesa per proporcionar una resposta a client.

Precisament, la importància del PLI i la complexitat de la DD en el context descrit, justifiquen el desenvolupament d'eines d'ajuda a la presa de decisions. No obstant això, els treballs trobats a la literatura, tot i que se centren en aportar models d'ajuda a la presa de decisions, no treballen el PLI en el seu conjunt, i no arriben a estandarditzar les operacions que es realitzen al llarg de el procés, sense mostrar clarament com es construeixen aquests models ni la composició dels diferents elements del model.

La present tesi desenvolupa un **Marc de Referència per al Desenvolupament Integrat de Models de Processos i Matemàtics en un context de LI (MR-DIMPM-LI)**, aportant una solució integrada que aborde el PLI en el seu conjunt i facilite la formalització del procés i la presa de decisions eficient i sostenible en cada cas concret. Mitjançant el Marc de Referència plantejat es promou el desenvolupament de models sostenibles, no només afavorint l'enteniment i la incorporació del PLI a les empreses sinó, a més, fent que aquest siga realment sostenible.

Aquest Marc de Referència s'ha aplicat a dos exemples reals amb xarxes de LI diferents. D'una banda, una xarxa de LI de bucle tancat en la qual el mateix fabricant de butaques de relax s'encarrega del seu PLI i, d'altra banda, una xarxa de LI de bucle obert en què professionals de LI tracten amb pneumàtics usats per donar-los una nova sortida. Com a resultat d'aquestes aplicacions, s'ha pogut comprovar la idoneïtat del Marc de Referència proposat pel que fa a la formalització del PLI i a la presa de decisions de la DD, fent-la més eficient i sostenible.

# **Índice General**

PARTE I. INTRODUCCIÓN .....	34
Capítulo 1. Introducción.....	35
Capítulo 2. Metodología de Investigación .....	58
PARTE II. ESTADO DEL ARTE.....	70
Capítulo 3. Logística Inversa. ....	74
Capítulo 4. El Proceso de Logística Inversa.....	87
Capítulo 5. Decisión sobre Disposición del Producto .....	132
PARTE III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y LÍNEAS DE ACTUACIÓN.....	165
Capítulo 6. Descripción del problema y líneas de actuación.....	166
PARTE IV. PROPUESTA .....	178
Capítulo 7. Propuesta de Marco de Referencia .....	179
Capítulo 8. Bloque I - Modelo genérico del PLI.....	188
Capítulo 9. Bloque II - Herramienta Matemática Genérica: Modelo Matemático .....	202
Capítulo 10. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Proceso de solución.....	270
Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación. ....	280
Capítulo 12. Bloque III - Modelo genérico integrado. ....	392
Capítulo 13. Metodología de adaptación y Bloque IV - Modelo particular integrado. ....	400
PARTE V. APLICACIÓN .....	408
Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax .....	409
Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.....	530
PARTE VI. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN .....	664
Capítulo 16. Conclusiones.....	665
Capítulo 17. Líneas futuras de investigación .....	681
REFERENCIAS .....	685

## **Índice General Detallado**

PARTE I. INTRODUCCIÓN .....	34
Capítulo 1. Introducción.....	35
1.1. Introducción .....	36
1.2. Planteamiento del problema y necesidad de la Tesis .....	40
1.3. Objetivos de la Tesis .....	45
1.4. Estructura de la Tesis .....	48
1.5. Referencias.....	54
Capítulo 2. Metodología de Investigación .....	58
2.1. Introducción .....	59
2.2. Justificación del enfoque de investigación.....	61
2.3. Fases de la metodología de investigación .....	66
2.4. Referencias.....	69
PARTE II. ESTADO DEL ARTE.....	70
Introducción al Estado del Arte.....	71
Referencias.....	72
Capítulo 3. Logística Inversa. ....	74
3.1. Introducción .....	75
3.2. Logística Inversa. Definición. ....	75
3.3. Sectores que más utilizan la LI.....	77
3.4. Tipos de Cadena de Suministro Inversa según el flujo del producto .....	82
3.5. Conclusiones .....	84
3.6. Referencias.....	85
Capítulo 4. El Proceso de Logística Inversa.....	87
4.1. Introducción .....	88
4.2. Visión general del PLI.....	88
4.3. Decisiones clave del PLI.....	107
4.4. Conclusiones .....	121
4.5. Referencias.....	123
Capítulo 5. Decisión sobre Disposición del Producto.....	132
5.1. Introducción .....	133
5.2. Decisión sobre la Disposición de Productos .....	133
5.3. Aspectos a considerar en la DD para que sea sostenible.....	136
5.4. Conclusiones .....	154
5.5. Conclusiones sobre el Estado del Arte .....	155
5.6. Referencias.....	156
PARTE III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y LÍNEAS DE ACTUACIÓN.....	165

Capítulo 6. Descripción del problema y líneas de actuación.....	166
6.1. Introducción .....	167
6.2. Descripción del problema.....	168
6.3. Líneas de actuación .....	173
6.4. Conclusiones .....	176
6.5. Referencias.....	177
PARTE IV. PROPUESTA .....	178
Capítulo 7. Propuesta de Marco de Referencia .....	179
7.1. Introducción .....	180
7.2. Marco de Referencia propuesto (MR-DIMPM-LI).....	180
7.3. Conclusiones .....	187
Capítulo 8. Bloque I - Modelo genérico del PLI.....	188
8.1. Introducción .....	189
8.2. Relación entre causas que activan el PLI y alternativas de disposición del producto... 190	
8.3. Caracterización de las decisiones clave de la LI .....	194
8.4. Propuesta de PLI en base a modelado de procesos de negocio.....	196
8.5. Conclusiones .....	200
Capítulo 9. Bloque II - Herramienta Matemática Genérica: Modelo Matemático .....	202
9.1. Introducción .....	203
9.2. Definición estructurada del problema a resolver con el MM .....	204
9.3. Identificación de los aspectos de sostenibilidad a considerar en cada alternativa de disposición de LI.....	206
9.4. Índices y parámetros.....	253
9.5. Variables de decisión .....	259
9.6. Función objetivo.....	260
9.7. Restricciones .....	262
9.8. Conclusiones .....	263
9.9. Referencias.....	264
Capítulo 10. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Proceso de solución.....	270
10.1. Introducción .....	271
10.2. Proceso de solución multi-objetivo .....	272
10.3. Conclusiones .....	278
10.4. Referencias.....	279
Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación. ....	280
11.1. Introducción .....	281
11.2. Requerimientos necesarios para aplicar la herramienta .....	282
11.3. Validación de la herramienta matemática genérica.....	286

11.4. Conclusiones .....	367
11.5. Anexos.....	368
Capítulo 12. Bloque III - Modelo genérico integrado.....	392
12.1. Introducción .....	393
12.2. Modelo genérico del PLI con el subproceso de solución .....	394
Capítulo 13. Metodología de adaptación y Bloque IV - Modelo particular integrado.....	400
13.1. Introducción .....	401
13.2. Metodología de adaptación del modelo genérico integrado a casos concretos .....	402
PARTE V. APLICACIÓN .....	408
Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax .....	409
14.1. Introducción .....	410
14.2. Adaptación del modelo genérico integrado al ejemplo de aplicación de sillones de relax: aplicación de la metodología de adaptación.....	415
14.3. Desarrollo del manual de usuario para la gestión de las recuperaciones .....	482
14.4. Aplicación del manual de usuario a tres productos recuperados.....	502
14.5. Resultados .....	514
14.6. Conclusiones .....	521
14.7. Referencias.....	523
14.8. Anexos.....	523
Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.....	530
15.1. Introducción .....	531
15.2. Adaptación del modelo genérico integrado al ejemplo de aplicación de neumáticos usados: aplicación de la metodología de adaptación.....	536
15.3. Desarrollo del manual de usuario para la gestión de las recuperaciones .....	618
15.4. Aplicación del manual de usuario a tres productos recuperados.....	633
15.5. Resultados .....	649
15.6. Conclusión.....	656
15.7. Referencias.....	658
15.8. Anexos.....	658
PARTE VI. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN .....	664
Capítulo 16. Conclusiones.....	665
16.1. Contribución de la investigación.....	666
16.2. Respuesta a las preguntas de investigación .....	668
16.3. Cumplimiento de los objetivos propuestos .....	671
16.4. Ámbito de aplicación del Marco de Referencia .....	677
16.5. Limitaciones.....	678
Capítulo 17. Líneas futuras de investigación .....	681
17.1. Principales líneas futuras de investigación.....	682

REFERENCIAS ..... 685

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Relación de los sectores englobados en cada grupo de la CNAE (Elaboración propia).	78
<b>Tabla 2.</b> Relación de sectores englobados en los grupos C y E de la CNAE (Elaboración propia).	79
<b>Tabla 3.</b> Relación de veces que cada sector industrial aparece en la literatura analizada (Elaboración propia).	81
<b>Tabla 4.</b> Categorías de decisión abordadas en cada trabajo revisado (Elaboración propia).	111
<b>Tabla 5.</b> Clasificación de decisiones clave en el ámbito de la LI (Elaboración propia).	121
<b>Tabla 6.</b> Detalles sobre la revisión de la literatura de los aspectos sociales en la LI (Elaboración propia).	148
<b>Tabla 7.</b> Métodos MCDM aplicados a la DD (Elaboración propia).	150
<b>Tabla 8.</b> Enfoque de sostenibilidad en los Métodos MCDM aplicados a la DD (Elaboración propia).	150
<b>Tabla 9.</b> Relaciones entre las funcionalidades del Marco de Referencia y las partes a desarrollar (Elaboración propia).	181
<b>Tabla 10.</b> Relaciones entre las funcionalidades, las partes a desarrollar y los bloques del Marco de Referencia (Elaboración propia).	183
<b>Tabla 11.</b> Relación entre causas que activan el proceso de LI y alternativas de disposición (Elaboración propia).	191
<b>Tabla 12.</b> Visión general de las alternativas de LI y sus costes correspondientes (Elaboración propia).	229
<b>Tabla 13.</b> Agrupación de aspectos sociales relacionados con la LI (Elaboración propia).	245
<b>Tabla 14.</b> Ventajas e inconvenientes de las principales herramientas de estudio de impacto ambiental (Elaboración propia).	285
<b>Tabla 15.</b> Alternativa seleccionada y valor óptimo para cada función objetivo (Elaboración propia).	363
<b>Tabla 16.</b> Alternativa seleccionada en forma de vector y valor óptimo para cada función objetivo (Elaboración propia).	364
<b>Tabla 17.</b> Valor óptimo para cada función objetivo (Elaboración propia).	364
<b>Tabla 18.</b> Valor de DPIP para las alternativas de tratamiento de productos y las primeras ocho alternativas de tratamiento de componentes (Elaboración propia).	366
<b>Tabla 19.</b> Valor de DPIP para las tres mejores alternativas con indicación sobre la mejora alternativa de disposición (Elaboración propia).	367
<b>Tabla 20.</b> Posibles alternativas de disposición para seleccionar si se aplican al modelo particular o no. (Elaboración propia).	403
<b>Tabla 21.</b> Ejemplo de tabla de parámetros ambientales con la selección de parámetros aplicables al caso particular (Elaboración propia).	404
<b>Tabla 22.</b> Ejemplo de Valores de rentabilidad económica correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia).	406
<b>Tabla 23.</b> Posibles alternativas de disposición para seleccionar si se aplican al ejemplo de aplicación o no (Elaboración propia).	416
<b>Tabla 24.</b> Alternativas de disposición aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).	420
<b>Tabla 25.</b> Parámetros económicos aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).	427
<b>Tabla 26.</b> Parámetros ambientales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).	432
<b>Tabla 27.</b> Parámetros sociales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).	437
<b>Tabla 28.</b> Valores económicos aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).	445



<b>Tabla 29.</b> Valores de rentabilidad económica correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia).....	451
<b>Tabla 30.</b> Valores ambientales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia). ....	460
<b>Tabla 31.</b> Valores de impacto ambiental correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia).....	464
<b>Tabla 32.</b> Tasa de desempleo y factor regional según las provincias donde se realizan operaciones (Elaboración propia).....	468
<b>Tabla 33.</b> Valores sociales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).....	469
<b>Tabla 34.</b> Valores de impacto social correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia).....	474
<b>Tabla 35.</b> Parámetros económicos aplicables al ejemplo de los sillones de relax con la distinción de fijos y variables (Elaboración propia).....	489
<b>Tabla 36.</b> Parámetros ambientales aplicables al ejemplo de los sillones de relax con la distinción de fijos y variables (Elaboración propia).....	489
<b>Tabla 37.</b> Parámetros sociales aplicables al ejemplo de los sillones de relax con la distinción de fijos y variables (Elaboración propia).....	490
<b>Tabla 38.</b> Alternativa seleccionada y valor óptimo para cada función objetivo (Elaboración propia).....	500
<b>Tabla 39.</b> Relación de posibles soluciones (Elaboración propia).....	500
<b>Tabla 40.</b> Valores de DPIP para cada posible solución (Elaboración propia).....	501
<b>Tabla 41.</b> Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores fijos para el caso 1 de sillones de relax (Elaboración propia).....	504
<b>Tabla 42.</b> Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores variables para el caso 1 de sillones de relax (Elaboración propia).....	505
<b>Tabla 43.</b> Valores de DPIP para cada posible solución del caso 1 de sillones de relax (Elaboración propia).....	506
<b>Tabla 44.</b> Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores fijos para el caso 2 de sillones de relax (Elaboración propia).....	508
<b>Tabla 45.</b> Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores variables para el caso 2 de sillones de relax (Elaboración propia).....	510
<b>Tabla 46.</b> Valores de DPIP para cada posible solución del caso 2 de sillones de relax (Elaboración propia).....	510
<b>Tabla 47.</b> Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores fijos para el caso 3 de sillones de relax (Elaboración propia).....	512
<b>Tabla 48.</b> Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores variables para el caso 3 de sillones de relax (Elaboración propia).....	514
<b>Tabla 49.</b> Valores de DPIP para cada posible solución del caso 3 de sillones de relax (Elaboración propia).....	514
<b>Tabla 50.</b> Valores del grado de aproximación al punto ideal (DPIP) para cada posible solución de los casos de sillones de relax (Elaboración propia).....	515
<b>Tabla 51.</b> Alternativas de solución determinadas según la política fija previa y la herramienta de solución para los tres casos de sillones de relax (Elaboración propia).....	516
<b>Tabla 52.</b> Datos de neumáticos puestos en el mercado en 2018 (Memoria anual Signus, 2018). .....	531
<b>Tabla 53.</b> Ecovalor vigente en España durante el 2018 (Memoria anual Signus 2018). .....	532
<b>Tabla 54.</b> Posibles alternativas de disposición para seleccionar si se aplican al ejemplo de aplicación o no (Elaboración propia). .....	537
<b>Tabla 55.</b> Alternativas de disposición aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia). .....	541
<b>Tabla 56.</b> Parámetros económicos aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia). .....	549
<b>Tabla 57.</b> Parámetros ambientales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia). .....	554

<b>Tabla 58.</b> Parámetros sociales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia). ....	560
<b>Tabla 59.</b> Datos de transporte utilizados en el ejemplo de aplicación (Elaboración propia)....	565
<b>Tabla 60.</b> Valores económicos aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia). ....	570
<b>Tabla 61.</b> Valores de rentabilidad económica correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia). .....	577
<b>Tabla 62.</b> Valores ambientales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia). ....	589
<b>Tabla 63.</b> Valores de impacto ambiental correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia). .....	594
<b>Tabla 64.</b> Datos y cálculos sobre el transporte entre la planta de recogida y clasificación y el nuevo cliente utilizados en el ejemplo de aplicación (Elaboración propia) .....	596
<b>Tabla 65.</b> Datos y cálculos sobre el transporte entre la planta de recogida y clasificación y la planta de valorización utilizados en el ejemplo de aplicación (Elaboración propia) .....	596
<b>Tabla 66.</b> Datos y cálculos sobre el transporte entre la planta de valorización y la planta de reciclaje utilizados en el ejemplo de aplicación (Elaboración propia) .....	597
<b>Tabla 67.</b> Datos y cálculos sobre el transporte entre la planta de valorización y la planta de incineración utilizados en el ejemplo de aplicación (Elaboración propia).....	598
<b>Tabla 68.</b> Tasas de desempleo y factor regional para cada provincia donde se realizan operaciones (Elaboración propia).....	599
<b>Tabla 69.</b> Valores sociales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).....	601
<b>Tabla 70.</b> Valores de impacto social correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia). .....	608
<b>Tabla 71.</b> Parámetros económicos aplicables al ejemplo de los neumáticos usados con la distinción de fijos y variables (Elaboración propia).....	620
<b>Tabla 72.</b> Parámetros ambientales aplicables al ejemplo de los neumáticos usados con la distinción de fijos y variables (Elaboración propia).....	621
<b>Tabla 73.</b> Parámetros sociales aplicables al ejemplo de los neumáticos usados con la distinción de fijos y variables (Elaboración propia). .....	622
<b>Tabla 74.</b> Alternativa seleccionada y valor óptimo para cada función objetivo (Elaboración propia). .....	631
<b>Tabla 75.</b> Relación de posibles soluciones (Elaboración propia).....	632
<b>Tabla 76.</b> Valores de DPIIP para cada posible solución (Elaboración propia).....	632
<b>Tabla 77.</b> Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores fijos para el caso 1 de neumáticos usados (Elaboración propia).....	637
<b>Tabla 78.</b> Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores variables para el caso 1 de neumáticos usados (Elaboración propia). .....	638
<b>Tabla 79.</b> Valores de DPIIP para cada posible solución del caso 1 de neumáticos usados (Elaboración propia).....	638
<b>Tabla 80.</b> Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores fijos para el caso 2 de neumáticos usados (Elaboración propia).....	642
<b>Tabla 81.</b> Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores variables para el caso 2 de neumáticos usados (Elaboración propia). .....	643
<b>Tabla 82.</b> Valores de DPIIP para cada posible solución del caso 2 de neumáticos usados (Elaboración propia).....	643
<b>Tabla 83.</b> Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores fijos para el caso 3 de neumáticos usados (Elaboración propia).....	647
<b>Tabla 84.</b> Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores variables para el caso 3 de neumáticos usados (Elaboración propia). .....	648
<b>Tabla 85.</b> Valores de DPIIP para cada posible solución del caso 3 de neumáticos usados (Elaboración propia).....	648
<b>Tabla 86.</b> Valores de DPIIP para cada posible solución de los casos de neumáticos usados (Elaboración propia).....	649

**Tabla 87.** Alternativas de solución determinadas según la política fija previa y la herramienta de solución para los tres casos de neumáticos usados (Elaboración propia). ..... 650

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Estructura general de la Tesis (Elaboración propia) .....	49
<b>Figura 2.</b> Clasificación de enfoques de investigación y localización del enfoque constructivo (adaptada de Neilimo y Näsi, 1980 y Kasanen et al., 1993) .....	60
<b>Figura 3.</b> Metodología de investigación (Elaboración propia).....	68
<b>Figura 4.</b> Relación entre los problemas detectados, líneas de actuación, contenido del Estado del Arte y solución planteada (Elaboración propia).....	71
<b>Figura 5.</b> Estructura de la CdSI de Lazo Cerrado (Xu et al., 2011) .....	83
<b>Figura 6.</b> Estructura de la CdSI de Lazo Abierto (Ene et al., 2014).....	84
<b>Figura 7.</b> Cadena de recuperación de productos (Fleischmann et al., 2000).....	89
<b>Figura 8.</b> Flujo básico de LD y LI (Agrawal et al., 2015).....	90
<b>Figura 9.</b> Marco de trabajo generalizado para la CdS de Lazo Cerrado (Sangwan, 2017) .....	90
<b>Figura 10.</b> Etapas generales del PLI (Elaboración Propia) .....	91
<b>Figura 11.</b> Visión general del proceso de LI (Elaboración Propia).....	92
<b>Figura 12.</b> Pirámide de opciones de disposición en la LI (Kumar y Malegeant, 2006) .....	98
<b>Figura 13.</b> Clasificación de Alternativas de disposición de Logística Inversa (Elaboración propia) .....	99
<b>Figura 14.</b> Relación entre la clasificación de Alternativas de disposición de Logística Inversa y la pirámide de disposición de LI (Elaboración propia) .....	100
<b>Figura 15.</b> Tipos de Disposición de Logística Inversa (Adaptado de Thierry et al., 1995) .....	106
<b>Figura 16.</b> Diagrama esquemático de un PLI combinado con LD (Adaptado de Agrawal y Singh, 2019).....	135
<b>Figura 17.</b> Fases y aplicaciones de la metodología LCA (Rebitzer <i>et al.</i> , 2004) .....	140
<b>Figura 18.</b> Relación entre los problemas detectados, las líneas de actuación y la solución planteada (Elaboración Propia) .....	173
<b>Figura 19.</b> Marco de Referencia propuesto (Elaboración Propia).....	183
<b>Figura 20.</b> Marco de Referencia propuesto con ejes de estructuración (Elaboración Propia) .	186
<b>Figura 21.</b> Ámbito del Marco de Referencia que se trabaja en el presente capítulo (Elaboración Propia).....	189
<b>Figura 22.</b> CdSI de lazo cerrado con la ubicación de las decisiones clave (Elaboración Propia) .....	196
<b>Figura 23.</b> Propuesta de Proceso de Logística Inversa genérico con la ubicación del momento de decisiones clave (Elaboración Propia).....	199
<b>Figura 24.</b> Ámbito de trabajo del capítulo sobre el Marco de Referencia Propuesto (Elaboración Propia).....	203
<b>Figura 25.</b> Estructura de ingresos relacionados con la LI (Elaboración propia) .....	208
<b>Figura 26.</b> Estructura de ingresos relacionados con la LI con el desglose de los ingresos comunes según finalidad y de los otros ingresos comunes a todas las alternativas (Elaboración propia) .....	210
<b>Figura 27.</b> Estructura de costes para las alternativas de tratamiento (Elaboración propia).....	212
<b>Figura 28.</b> Costes referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los costes comunes a todas las alternativas (Elaboración propia) .....	213
<b>Figura 29.</b> Costes referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (Elaboración propia) .....	215
<b>Figura 30.</b> Costes referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (Elaboración propia) .....	217

<b>Figura 31.</b> Costes referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor (Elaboración propia).....	218
<b>Figura 32.</b> Costes referentes a la alternativa de Reutilización (Elaboración propia) .....	220
<b>Figura 33.</b> Costes referentes a la alternativa de Reparación (Elaboración propia) .....	221
<b>Figura 34.</b> Costes referentes a la alternativa de Reacondicionamiento (Elaboración propia) ..	222
<b>Figura 35.</b> Costes referentes a la alternativa de Remanufacturaación (Elaboración propia) .....	223
<b>Figura 36.</b> Costes referentes a la alternativa de Canibalización (Elaboración propia).....	224
<b>Figura 37.</b> Costes referentes a la alternativa de Reciclaje (Elaboración propia).....	226
<b>Figura 38.</b> Costes referentes a la alternativa de Incineración (Elaboración propia).....	227
<b>Figura 39.</b> Costes referentes a la alternativa de Vertido (Elaboración propia) .....	228
<b>Figura 40.</b> Estructura de aspectos ambientales para las alternativas de tratamiento (Elaboración propia) .....	232
<b>Figura 41.</b> Aspectos ambientales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos ambientales comunes a todas las alternativas (Elaboración propia) .....	233
<b>Figura 42.</b> Aspectos ambientales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos ambientales comunes a todas las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (Elaboración propia) .....	234
<b>Figura 43.</b> Aspectos ambientales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos ambientales comunes a todas las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (Elaboración propia).....	235
<b>Figura 44.</b> Aspectos ambientales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos ambientales comunes a todas las alternativas con la finalidad de eliminación (Elaboración propia).....	236
<b>Figura 45.</b> Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Reutilización/Reuso (Elaboración propia) .....	237
<b>Figura 46.</b> Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Reparación (Elaboración propia) .....	238
<b>Figura 47.</b> Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Reacondicionamiento (Elaboración propia).....	238
<b>Figura 48.</b> Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Remanufacturaación (Elaboración propia) .....	239
<b>Figura 49.</b> Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Canibalización (Elaboración propia) .....	239
<b>Figura 50.</b> Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Reciclaje (Elaboración propia) .....	240
<b>Figura 51.</b> Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Incineración (Elaboración propia) .....	241
<b>Figura 52.</b> Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Vertido (Elaboración propia) ..	242
<b>Figura 53.</b> Visión general de composición del impacto ambiental de cada alternativa (Elaboración propia).....	243
<b>Figura 54.</b> Estructura de aspectos sociales para las alternativas de tratamiento (Elaboración propia) .....	248
<b>Figura 55.</b> Aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos sociales comunes a todas las alternativas (Elaboración propia) .....	249
<b>Figura 56.</b> Aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos sociales comunes a todas las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (Elaboración propia).....	250
<b>Figura 57.</b> Aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos sociales comunes a todas las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (Elaboración propia).....	251

<b>Figura 58.</b> Aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos sociales comunes a todas las alternativas con la finalidad de eliminación (Elaboración propia) .....	252
<b>Figura 59.</b> Aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición (Elaboración propia) .....	253
<b>Figura 60.</b> Ámbito de trabajo del capítulo sobre el Marco de Referencia propuesto (Elaboración Propia) .....	272
<b>Figura 61.</b> Funcionamiento del Modelo Matemático (Elaboración propia) .....	273
<b>Figura 62.</b> Esquema de los pasos del Proceso de solución a seguir (Elaboración propia) .....	277
<b>Figura 63.</b> Modelo del proceso de solución a seguir utilizando el lenguaje de modelado BPMN (Elaboración propia) .....	278
<b>Figura 64.</b> Ámbito de trabajo del capítulo sobre el Marco de Referencia propuesto (Elaboración Propia) .....	281
<b>Figura 65.</b> Diagrama de relaciones del modelo matemático económico (Elaboración propia) .....	288
<b>Figura 66.</b> Ejemplo de BBDD del modelo matemático económico (Elaboración propia) .....	288
<b>Figura 67.</b> Ejemplo de archivo de solución MPL del modelo matemático económico (Elaboración propia) .....	289
<b>Figura 68.</b> Estructura de los parámetros de la BBDD del modelo matemático económico (Elaboración propia) .....	292
<b>Figura 69.</b> BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Reutilización 1 (Elaboración propia) .....	293
<b>Figura 70.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Reutilización 1 (Elaboración propia) .....	293
<b>Figura 71.</b> BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Reutilización 2 (Elaboración propia) .....	294
<b>Figura 72.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Reutilización 2 (Elaboración propia) .....	294
<b>Figura 73.</b> BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Reparación (Elaboración propia) .....	294
<b>Figura 74.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Reparación (Elaboración propia) .....	295
<b>Figura 75.</b> BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Reacondicionamiento (Elaboración propia) .....	295
<b>Figura 76.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Reacondicionamiento (Elaboración propia) .....	296
<b>Figura 77.</b> BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Remanufactura (Elaboración propia) .....	296
<b>Figura 78.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Remanufactura (Elaboración propia) .....	297
<b>Figura 79.</b> BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Canibalización (Elaboración propia) .....	297
<b>Figura 80.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Canibalización (Elaboración propia) .....	298
<b>Figura 81.</b> BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Reciclaje (Elaboración propia) .....	298
<b>Figura 82.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Reciclaje (Elaboración propia) .....	299
<b>Figura 83.</b> BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Incineración (Elaboración propia) .....	299
<b>Figura 84.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Incineración (Elaboración propia) .....	300

<b>Figura 85.</b> BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Vertido (Elaboración propia).....	300
<b>Figura 86.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Vertido (Elaboración propia).....	301
<b>Figura 87.</b> BBDD del modelo matemático económico con heterogeneidad en las alternativas de los componentes (Elaboración propia).....	301
<b>Figura 88.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico con heterogeneidad en las alternativas de los componentes (Elaboración propia).....	302
<b>Figura 89.</b> Diagrama de relaciones del modelo matemático ambiental (Elaboración propia) .	303
<b>Figura 90.</b> Estructura de los parámetros de la BBDD del modelo matemático ambiental (Elaboración propia).....	303
<b>Figura 91.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reutilización 1 (Elaboración propia).....	304
<b>Figura 92.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reutilización 1 (Elaboración propia).....	304
<b>Figura 93.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reutilización 2 (Elaboración propia).....	305
<b>Figura 94.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reutilización 2 (Elaboración propia).....	305
<b>Figura 95.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reutilización 3 (Elaboración propia).....	306
<b>Figura 96.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reutilización 3 (Elaboración propia).....	306
<b>Figura 97.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reparación 1 (Elaboración propia).....	306
<b>Figura 98.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reparación 1 (Elaboración propia).....	307
<b>Figura 99.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reparación 2 (Elaboración propia).....	307
<b>Figura 100.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reparación 2 (Elaboración propia).....	308
<b>Figura 101.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reparación 3 (Elaboración propia).....	308
<b>Figura 102.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reparación 3 (Elaboración propia).....	309
<b>Figura 103.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reacondicionamiento 1 (Elaboración propia).....	309
<b>Figura 104.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reacondicionamiento 1 (Elaboración propia).....	310
<b>Figura 105.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reacondicionamiento 2 (Elaboración propia).....	310
<b>Figura 106.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reacondicionamiento 2 (Elaboración propia).....	311
<b>Figura 107.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reacondicionamiento 3 (Elaboración propia).....	311
<b>Figura 108.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reacondicionamiento 3 (Elaboración propia).....	312
<b>Figura 109.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Remanufactura- ción 1 (Elaboración propia).....	312
<b>Figura 110.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Remanufactura- ción 1 (Elaboración propia).....	313

<b>Figura 111.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Remanufactura- ción 2 (Elaboración propia).....	313
<b>Figura 112.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Remanufactura- ción 2 (Elaboración propia).....	314
<b>Figura 113.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Remanufactura- ción 3 (Elaboración propia).....	314
<b>Figura 114.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Remanufactura- ción 3 (Elaboración propia).....	315
<b>Figura 115.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Canibalización 1 (Elaboración propia).....	315
<b>Figura 116.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Canibalización 1 (Elaboración propia) .....	316
<b>Figura 117.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Canibalización 2 (Elaboración propia).....	316
<b>Figura 118.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Canibalización 2 (Elaboración propia) .....	317
<b>Figura 119.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Canibalización 3 (Elaboración propia).....	317
<b>Figura 120.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Canibalización 3 (Elaboración propia) .....	318
<b>Figura 121.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reciclaje 1 (Elaboración propia).....	318
<b>Figura 122.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reciclaje 1 (Elaboración propia) .....	319
<b>Figura 123.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reciclaje 2 (Elaboración propia).....	319
<b>Figura 124.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reciclaje 2 (Elaboración propia) .....	320
<b>Figura 125.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reciclaje 3 (Elaboración propia).....	320
<b>Figura 126.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reciclaje 3 (Elaboración propia) .....	321
<b>Figura 127.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Incineración 1 (Elaboración propia).....	321
<b>Figura 128.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Incineración 1 (Elaboración propia) .....	322
<b>Figura 129.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Incineración 2 (Elaboración propia).....	322
<b>Figura 130.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Incineración 2 (Elaboración propia) .....	323
<b>Figura 131.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Incineración 3 (Elaboración propia).....	323
<b>Figura 132.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Incineración 3 (Elaboración propia) .....	324
<b>Figura 133.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Vertido 1 (Elaboración propia).....	324
<b>Figura 134.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Vertido 1 (Elaboración propia).....	325
<b>Figura 135.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Vertido 2 (Elaboración propia).....	325



<b>Figura 136.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Vertido 2 (Elaboración propia).....	326
<b>Figura 137.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Vertido 3 (Elaboración propia).....	326
<b>Figura 138.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Vertido 3 (Elaboración propia).....	327
<b>Figura 139.</b> BBDD del modelo matemático ambiental con heterogeneidad en las alternativas de los componentes (Elaboración propia).....	327
<b>Figura 140.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental con heterogeneidad en las alternativas de los componentes (Elaboración propia) .....	328
<b>Figura 141.</b> Diagrama de relaciones del modelo matemático social (Elaboración propia).....	329
<b>Figura 142.</b> Estructura de los parámetros de la BBDD del modelo matemático social (Elaboración propia).....	329
<b>Figura 143.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reutilización 1 (Elaboración propia).....	330
<b>Figura 144.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reutilización 1 (Elaboración propia).....	331
<b>Figura 145.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reutilización 2 (Elaboración propia).....	331
<b>Figura 146.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reutilización 2 (Elaboración propia).....	332
<b>Figura 147.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reutilización 3 (Elaboración propia).....	332
<b>Figura 148.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reutilización 3 (Elaboración propia).....	333
<b>Figura 149.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reparación 1 (Elaboración propia).....	333
<b>Figura 150.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reparación 1 (Elaboración propia).....	334
<b>Figura 151.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reparación 2 (Elaboración propia).....	334
<b>Figura 152.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reparación 2 (Elaboración propia).....	335
<b>Figura 153.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reparación 3 (Elaboración propia).....	335
<b>Figura 154.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reparación 3 (Elaboración propia).....	336
<b>Figura 155.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reacondicionamiento 1 (Elaboración propia).....	336
<b>Figura 156.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reacondicionamiento 1 (Elaboración propia) .....	337
<b>Figura 157.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reacondicionamiento 2 (Elaboración propia).....	337
<b>Figura 158.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reacondicionamiento 2 (Elaboración propia) .....	338
<b>Figura 159.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reacondicionamiento 3 (Elaboración propia).....	338
<b>Figura 160.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reacondicionamiento 3 (Elaboración propia) .....	339
<b>Figura 161.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Remanufacturación 1 (Elaboración propia).....	339

<b>Figura 162.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Remanufacturaación 1 (Elaboración propia).....	340
<b>Figura 163.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Remanufacturaación 2 (Elaboración propia).....	340
<b>Figura 164.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Remanufacturaación 2 (Elaboración propia).....	341
<b>Figura 165.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Remanufacturaación 3 (Elaboración propia).....	341
<b>Figura 166.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Remanufacturaación 3 (Elaboración propia).....	342
<b>Figura 167.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Canibalización 1 (Elaboración propia).....	342
<b>Figura 168.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Canibalización 1 (Elaboración propia) .....	343
<b>Figura 169.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Canibalización 2 (Elaboración propia).....	343
<b>Figura 170.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Canibalización 2 (Elaboración propia) .....	344
<b>Figura 171.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Canibalización 3 (Elaboración propia).....	344
<b>Figura 172.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Canibalización 3 (Elaboración propia) .....	345
<b>Figura 173.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reciclaje 1 (Elaboración propia).....	345
<b>Figura 174.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reciclaje 1 (Elaboración propia) .....	346
<b>Figura 175.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reciclaje 2 (Elaboración propia).....	346
<b>Figura 176.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reciclaje 2 (Elaboración propia) .....	347
<b>Figura 177.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reciclaje 3 (Elaboración propia).....	347
<b>Figura 178.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reciclaje 3 (Elaboración propia) .....	348
<b>Figura 179.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Incineración 1 (Elaboración propia).....	348
<b>Figura 180.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Incineración 1 (Elaboración propia) .....	349
<b>Figura 181.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Incineración 2 (Elaboración propia).....	349
<b>Figura 182.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Incineración 2 (Elaboración propia) .....	350
<b>Figura 183.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Incineración 3 (Elaboración propia).....	350
<b>Figura 184.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Incineración 3 (Elaboración propia) .....	351
<b>Figura 185.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Vertido 1 (Elaboración propia) .....	351
<b>Figura 186.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Vertido 1 (Elaboración propia).....	352

<b>Figura 187.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Vertido 2 (Elaboración propia) .....	352
<b>Figura 188.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Vertido 2 (Elaboración propia).....	353
<b>Figura 189.</b> BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Vertido 3 (Elaboración propia) .....	353
<b>Figura 190.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Vertido 3 (Elaboración propia).....	354
<b>Figura 191.</b> BBDD del modelo matemático social con heterogeneidad en las alternativas de componentes (Elaboración propia).....	354
<b>Figura 192.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social con heterogeneidad en las alternativas de componentes (Elaboración propia).....	355
<b>Figura 193.</b> BBDD del modelo matemático social con casos especiales 1 (Elaboración propia) .....	356
<b>Figura 194.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social con casos especiales 1 (Elaboración propia) .....	356
<b>Figura 195.</b> BBDD del modelo matemático social con casos especiales 2 (Elaboración propia) .....	357
<b>Figura 196.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social con casos especiales 2 (Elaboración propia) .....	357
<b>Figura 197.</b> BBDD del modelo matemático social con casos especiales 3 (Elaboración propia) .....	357
<b>Figura 198.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social con casos especiales 3 (Elaboración propia) .....	358
<b>Figura 199.</b> BBDD del modelo matemático social con casos especiales 4 (Elaboración propia) .....	358
<b>Figura 200.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social con casos especiales 4 (Elaboración propia) .....	359
<b>Figura 201.</b> BBDD del modelo matemático económico para la validación del proceso de solución (Elaboración propia) .....	360
<b>Figura 202.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la validación del proceso de solución (Elaboración propia) .....	361
<b>Figura 203.</b> BBDD del modelo matemático ambiental para la validación del proceso de solución (Elaboración propia) .....	361
<b>Figura 204.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la validación del proceso de solución (Elaboración propia) .....	362
<b>Figura 205.</b> BBDD del modelo matemático social para la validación del proceso de solución (Elaboración propia).....	362
<b>Figura 206.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la validación del proceso de solución (Elaboración propia) .....	363
<b>Figura 207.</b> Ámbito de trabajo del capítulo sobre el Marco de Referencia propuesto (Elaboración Propia) .....	393
<b>Figura 208.</b> Propuesta de PLI genérico con la incorporación del Subproceso de Solución (Elaboración Propia) .....	399
<b>Figura 209.</b> Ámbito de trabajo del capítulo sobre el Marco de Referencia propuesto (Elaboración Propia) .....	401
<b>Figura 210.</b> Esquema de la Metodología de adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado (Elaboración Propia) .....	402
<b>Figura 211.</b> Tipo de producto tratado en el ejemplo de aplicación (Elaboración propia) .....	411
<b>Figura 212.</b> Equilibrio entre el beneficio del mercado primario y secundario (Elaboración propia) .....	413

<b>Figura 213.</b> Metodología de adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado (Elaboración Propia) .....	416
<b>Figura 214.</b> Estructura de ingresos relacionados con la LI con el desglose de los ingresos comunes y de los otros ingresos (Elaboración propia).....	421
<b>Figura 215.</b> Estructura de costes relacionados con la LI con el desglose de los costes comunes y específicos (Elaboración propia).....	423
<b>Figura 216.</b> Combinación de la estructura de ingresos y costes con los parámetros económicos aplicables al ejemplo (Elaboración propia).....	428
<b>Figura 217.</b> Estructura de aspectos ambientales relacionados con la LI con el desglose de los aspectos ambientales comunes y específicos (Elaboración propia).....	429
<b>Figura 218.</b> Combinación de la estructura de impacto ambiental con los parámetros ambientales aplicables al ejemplo (Elaboración propia).....	433
<b>Figura 219.</b> Estructura de aspectos sociales relacionados con la LI con el desglose de los aspectos sociales comunes y específicos (Elaboración propia).....	434
<b>Figura 220.</b> Combinación de la estructura de impacto social con los parámetros sociales aplicables al ejemplo (Elaboración propia).....	438
<b>Figura 221.</b> Estructura de ingresos y costes que componen la rentabilidad económica de las alternativas de LI (Elaboración propia).....	446
<b>Figura 222.</b> Entrada datos del parámetro ambiental $EIT_{1i}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	452
<b>Figura 223.</b> Valores obtenidos del parámetro ambiental $EIT_{1i}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	452
<b>Figura 224.</b> Entrada datos del parámetro ambiental $EIT_{2Bi}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	453
<b>Figura 225.</b> Valores obtenidos del parámetro ambiental $EIT_{2Bi}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	453
<b>Figura 226.</b> Entrada datos del parámetro ambiental $EIP_{1ij}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	454
<b>Figura 227.</b> Valores obtenidos del parámetro ambiental $EIP_{1ij}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	454
<b>Figura 228.</b> Entrada datos del parámetro ambiental $EIT_{3i1}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	455
<b>Figura 229.</b> Valores obtenidos del parámetro ambiental $EIT_{3i1}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	455
<b>Figura 230.</b> Entrada datos del parámetro ambiental $EIT_{3i2}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	455
<b>Figura 231.</b> Valores obtenidos del parámetro ambiental $EIT_{3i2}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	455
<b>Figura 232.</b> Entrada datos del parámetro ambiental $EIT_{3i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	456
<b>Figura 233.</b> Valores obtenidos del parámetro ambiental $EIT_{3i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	456
<b>Figura 234.</b> Entrada datos del parámetro ambiental $EIP_{2i}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	456
<b>Figura 235.</b> Valores obtenidos del parámetro ambiental $EIP_{2i}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	457
<b>Figura 236.</b> Entrada datos del parámetro ambiental $EIR_{i1}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	457
<b>Figura 237.</b> Valores obtenidos del parámetro ambiental $EIR_{i1}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	457
<b>Figura 238.</b> Entrada datos del parámetro ambiental $EIR_{i2}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	458
<b>Figura 239.</b> Valores obtenidos del parámetro ambiental $EIR_{i2}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	458
<b>Figura 240.</b> Entrada datos del parámetro ambiental $EIR_{i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	458

<b>Figura 241.</b> Valores obtenidos del parámetro ambiental $EIR_{i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	458
<b>Figura 242.</b> Estructura de aspectos que componen el impacto ambiental de las alternativas de LI (Elaboración propia).....	460
<b>Figura 243.</b> Modelo genérico del PLI integrado mostrando con un marco rojo indicando dónde se introducen los cambios en la adaptación (Elaboración Propia) .....	476
<b>Figura 244.</b> Modelo particular del PLI integrado con un marco rojo indicando dónde se introducen los cambios en la adaptación al ejemplo de aplicación de los sillones de relax (Elaboración propia).....	477
<b>Figura 245.</b> Contextualización de las tres Fases generales en la obtención y gestión del modelo matemático particular (Elaboración Propia).....	483
<b>Figura 246.</b> Contextualización de las tres Fases generales en la obtención y gestión del modelo matemático particular y la información utilizada en cada fase (Elaboración Propia) .....	485
<b>Figura 247.</b> Contextualización de las tres Fases generales en la obtención y gestión del modelo matemático particular, la información utilizada y el perfil necesario en cada fase (Elaboración Propia).....	485
<b>Figura 248.</b> Contextualización y contenido del manual de usuario para la gestión de la recuperación de productos (Elaboración propia).....	487
<b>Figura 249.</b> BBDD del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax (Elaboración propia) .....	492
<b>Figura 250.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax (Elaboración propia).....	492
<b>Figura 251.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax con $REU = 0$ (Elaboración propia).....	494
<b>Figura 252.</b> BBDD del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax con $Cref = 129$ (Elaboración propia) .....	494
<b>Figura 253.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax con $Cref = 129$ (Elaboración propia).....	495
<b>Figura 254.</b> BBDD del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax con $Cref = 130$ (Elaboración propia) .....	495
<b>Figura 255.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax con $Cref = 130$ (Elaboración propia).....	496
<b>Figura 256.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax con $REU=REF=OUT= 0$ (Elaboración propia).....	496
<b>Figura 257.</b> BBDD del modelo matemático ambiental del ejemplo de aplicación Sillones de Relax (Elaboración propia) .....	497
<b>Figura 258.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental del ejemplo de aplicación Sillones de Relax (Elaboración propia).....	498
<b>Figura 259.</b> BBDD del modelo matemático social del ejemplo de aplicación Sillones de Relax (Elaboración propia).....	498
<b>Figura 260.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social del ejemplo de aplicación Sillones de Relax (Elaboración propia) .....	499
<b>Figura 261.</b> Evolución del valor DPIP para las alternativas de outlet y reacondicionamiento según valores de $Cref$ (Elaboración propia) .....	518
<b>Figura 262.</b> Umbrales de las alternativas más adecuadas en función del valor de $Cref$ (Elaboración Propia) .....	519
<b>Figura 263.</b> Evolución del valor DPIP para las alternativas de outlet y reacondicionamiento según valores de $Sout$ (Elaboración propia) .....	520
<b>Figura 264.</b> Umbrales de las alternativas más adecuadas en función del valor de $Sout$ (Elaboración Propia) .....	521
<b>Figura 265.</b> Neumáticos susceptibles de ser reutilizados (Memoria Signus, 2017).....	532

<b>Figura 266.</b> Neumático al final de su vida útil (Memoria Signus 2017).....	534
<b>Figura 267.</b> Metodología de adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado (Elaboración Propia) .....	537
<b>Figura 268.</b> Esquema configuración de la red para cada alternativa de tratamiento (Elaboración Propia).....	541
<b>Figura 269.</b> Estructura de ingresos relacionados con la LI con el desglose de los ingresos comunes y de los otros ingresos (Elaboración propia).....	542
<b>Figura 270.</b> Estructura de costes relacionados con la LI con el desglose de los costes comunes y específicos (Elaboración propia).....	544
<b>Figura 271.</b> Combinación de la estructura de ingresos y costes con los parámetros económicos aplicables al ejemplo (Elaboración propia).....	550
<b>Figura 272.</b> Estructura de aspectos ambientales relacionados con la LI con el desglose de los aspectos ambientales comunes y específicos (Elaboración propia).....	551
<b>Figura 273.</b> Combinación de la estructura de impacto ambiental con los parámetros ambientales aplicables al ejemplo (Elaboración propia).....	555
<b>Figura 274.</b> Estructura de aspectos sociales relacionados con la LI con el desglose de los aspectos sociales comunes y específicos (Elaboración propia).....	556
<b>Figura 275.</b> Combinación de la estructura de impacto social con los parámetros sociales aplicables al ejemplo (Elaboración propia).....	561
<b>Figura 276.</b> Estructura de ingresos y costes que componen la rentabilidad económica de las alternativas de LI (Elaboración propia).....	571
<b>Figura 277.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIT_{1i}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	578
<b>Figura 278.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIT_{1i}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	578
<b>Figura 279.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIT_{2Ai}$ en OpenLCA (Elaboración propia).....	579
<b>Figura 280.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIT_{2Ai}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	579
<b>Figura 281.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIT_{2Bi}$ en OpenLCA (Elaboración propia).....	579
<b>Figura 282.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIT_{2Bi}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	579
<b>Figura 283.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIT_{2Ci}$ en OpenLCA (Elaboración propia).....	580
<b>Figura 284.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIT_{2Ci}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	580
<b>Figura 285.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIT_{3i}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	580
<b>Figura 286.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIT_{3i}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	580
<b>Figura 287.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIP_{2i}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	581
<b>Figura 288</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIP_{2i}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	581
<b>Figura 289.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIT_{4i1}$ en OpenLCA (Elaboración propia).....	582
<b>Figura 290.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIT_{4i1}$ en OpenLCA (Elaboración propia) .....	582
<b>Figura 291.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIT_{4i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia).....	582

<b>Figura 292.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIT_{4i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	582
<b>Figura 293.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIT_{5i2}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	583
<b>Figura 294.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIT_{5i2}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	583
<b>Figura 295.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIT_{5i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	584
<b>Figura 296.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIT_{5i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	584
<b>Figura 297.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIP_{i1}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	584
<b>Figura 298.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIP_{i1}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	584
<b>Figura 299.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIR_{i1}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	585
<b>Figura 300.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIR_{i1}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	585
<b>Figura 301.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EIR_{i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	585
<b>Figura 302.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIR_{i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	586
<b>Figura 303.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EII_{i2}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	586
<b>Figura 304.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EIR_{i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	586
<b>Figura 305.</b> Entrada de datos de factores de impacto ambiental $EII_{i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	586
<b>Figura 306.</b> Valores obtenidos de impacto ambiental $EII_{i3}$ en OpenLCA (Elaboración propia)	587
<b>Figura 307.</b> Estructura de aspectos que componen el impacto ambiental de las alternativas de LI (Elaboración propia)	589
<b>Figura 308.</b> Modelo genérico del PLI integrado mostrando con un marco rojo indicando dónde se introducen los cambios en la adaptación (Elaboración Propia)	612
<b>Figura 309.</b> Modelo particular del PLI integrado con un marco rojo indicando dónde se introducen los cambios en la adaptación al ejemplo de aplicación de los neumáticos usados (Elaboración propia)	613
<b>Figura 310.</b> BBDD del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados (Elaboración propia)	624
<b>Figura 311.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados (Elaboración propia)	625
<b>Figura 312.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados con $REF=0$ (Elaboración propia)	626
<b>Figura 313.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados con $REF=OCA=0$ (Elaboración propia)	626
<b>Figura 314.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados con $REF=OUT=GOM=0$ (Elaboración propia)	627
<b>Figura 315.</b> BBDD del modelo matemático ambiental del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados (Elaboración propia)	628
<b>Figura 316.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados (Elaboración propia)	628

<b>Figura 317.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados con OCA=0 (Elaboración propia) .....	629
<b>Figura 318.</b> BBDD del modelo matemático social del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados (Elaboración propia).....	630
<b>Figura 319.</b> Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados (Elaboración propia) .....	630
<b>Figura 320.</b> Evolución del valor DPIP para las alternativas de outlet y reacondicionamiento según valores de Cref (Elaboración propia) .....	653
<b>Figura 321.</b> Umbrales de las alternativas más adecuadas en función del valor de la distancia a la que se encuentra el cliente del neumático de ocasión (Elaboración Propia).....	654
<b>Figura 322.</b> Evolución del valor DPIP para las alternativas de outlet y reacondicionamiento según valores de Cref (Elaboración propia) .....	655
<b>Figura 323.</b> Umbrales de las alternativas más adecuadas en función del valor del tiempo de almacenaje previo antes de la reutilización (Elaboración Propia).....	656
<b>Figura 324.</b> Marco de Referencia propuesto con la incorporación del Bloque V (Elaboración Propia).....	667



## **Glosario de Términos**

**AG:** Algoritmos Genéticos

**BBDD:** Base de Datos

**BPM (*Business Process Management*):** Gestión de procesos de negocio

**CdS:** Cadena de Suministro

**CdSI:** Cadena de Suministro Inversa

**DD (*Disposition Decision*):** Decisión sobre Disposición del producto

**DPIP (*Degree Proximity Ideal Point*):** Grado de aproximación al punto ideal

**EA:** Estado del Arte

**GRI (*Global Report Initiative*):** Iniciativa de informe global

**LCA (*Life Cycle Assessment*):** Análisis del ciclo de vida

**LD:** Logística Directa o tradicional

**LI:** Logística Inversa

**MCDM (*Multi Criteria Decision Making*):** Toma de decisiones multicriterio

**MILP (*Mixed Integer Linear Programming*):** Programación lineal entera mixta

**MM:** Modelo Matemático

**MOO (*Multi-objective Optimization*):** Optimización multi-objetivo

**MPL (*Mathematical Programming Language*):** Lenguaje de programación matemática

**MR:** Marco de Referencia

**MR-DIMPM-LI:** Marco de Referencia para el Desarrollo Integrado de Modelos de Procesos y Matemáticos de ayuda a la toma de decisión en un contexto de Logística Inversa

**ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible

**PLI:** Proceso de Logística Inversa

# **PARTE I. INTRODUCCIÓN**

# **Capítulo 1. Introducción.**

## 1.1.Introducción

Dentro del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación para el periodo 2017 – 2020 (Gobierno de España, 2017), se incluye como un **reto de la sociedad** “**El cambio climático y la utilización de recursos naturales y materias primas**”. Dicho reto promueve actividades de I+D+i orientadas a impulsar la sostenibilidad en las acciones que afectan a los recursos naturales, basándose en el desarrollo de la “economía circular”. El objetivo que persigue la **economía circular** es que el valor de los productos, los materiales y los recursos (agua, energía, ...) se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible y que se reduzca al mínimo la generación de residuos (<http://economiecircular.org>). Al mismo tiempo, desde la **estrategia Europa 2020**, se pretende forjar un crecimiento integrador, inteligente y sostenible, donde se pueda conseguir “Una Europa que utilice eficazmente los recursos”.

Además, desde la agenda 2030 promovida por las Naciones Unidas, se promueven diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que persiguen la igualdad entre las personas, proteger el planeta y asegurar la prosperidad, a nivel mundial (<https://www.agenda2030.gob.es>). Dentro de los ODS, concretamente el objetivo número doce, habla sobre **Producción y Consumo Responsable** y aspira a estimular la implementación de prácticas sostenibles en empresas. Dicho objetivo persigue una transición de los modelos económicos, productivos y de consumo hacia la sostenibilidad, donde una de sus principales metas pasa por reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización.

Muchos de los productos que llegan al final de su vida útil, se convierten en, o generan, residuos tóxicos y perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente. Especialmente, productos de gran consumo que, por tener un ciclo de vida corto y renovarse con frecuencia (como, por ejemplo, artículos eléctricos o electrónicos) suponen una gran cantidad de residuos difícil de tratar. Un manejo indebido de estos residuos puede causar daños graves en su entorno y en el ecosistema en general (Hanafi *et al.*, 2008).

Este tipo de problemas con los residuos, junto con la sobreexplotación de los recursos naturales y la escasa capacidad de absorber, de manera sostenible, todos los productos

generados, está forjando una concienciación en la sociedad en busca de la conservación y respeto del medio ambiente (Han *et al.*, 2016).

Todos estos aspectos, junto con casos recientes de acciones de gran impacto ambiental, sirven como base para que las Administraciones Públicas aprueben y refuercen leyes que favorezcan la reutilización de las materias primas, minimicen el impacto ambiental y prolonguen la vida útil de los productos (Prakash y Barua, 2016).

Dichas novedades legislativas, suponen una nueva preocupación para las empresas, obligándoles a cumplir una serie de requisitos medioambientales respecto al tratamiento de residuos. En este escenario, las empresas se ven ante la necesidad de crear nuevos flujos inversos de recuperación y tratamiento de productos (Ravi *et al.*, 2005), no sólo con la idea de cumplir la legislación y reducir el impacto ambiental, sino también con la intención de rentabilizar al máximo el valor económico de sus productos y procesos productivos, mejorando además su imagen ante la sociedad (Pokharel y Mutha, 2009; Steeneck y Sarin, 2013). De esta forma, se les fuerza a incorporar un enfoque de sostenibilidad en sus actividades y estrategias de negocio.

Este nuevo flujo de materiales, contrario al flujo logístico directo o tradicional, es conocido como flujo logístico inverso o **Logística Inversa (LI)** e incluye, no solo el transporte del producto desde el usuario o consumidor final hasta el productor o vendedor, sino también todas aquellas actividades relacionadas con la clasificación y tratamiento del producto recuperado, y de sus diferentes componentes. La gestión adecuada de la LI se considera importante por su trascendencia en las operaciones de la empresa y por su rentabilidad económica, además de porque supone un elemento fundamental para la captación y fidelización de los clientes.

Por todas estas razones, la gestión de los flujos de retorno ha recibido una atención especial desde principios del siglo XXI (Pokharel y Mutha, 2009), pero además, el movimiento inverso de productos se ha visto incrementado durante los últimos años debido al auge del comercio electrónico.

El comercio online ha cambiado la forma de ir de compras y ha estado creciendo en España vertiginosamente, durante los últimos años, a una tasa de dos dígitos (Cárdenas *et al.*, 2017), superando, por ejemplo, los 30 mil millones de euros durante el 2017 o algo más de 40 mil millones en 2018, lo que significa tasas interanuales del 25% y del 29%

respectivamente, según la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC). De hecho, la previsión era que en 2019 se llegara a un resultado superior a los 50 mil millones de euros en ventas, como así sucedió.

Según el [Departamento de Comercio de los Estados Unidos](#), las ventas a través del *e-commerce* en EEUU superaron los 500 mil millones de dólares en 2018. Asimismo, la mayor empresa de comercio electrónico del mundo ([www.alibabagroup.com](http://www.alibabagroup.com)), vendió a través de su plataforma unos 9'3 mil millones de dólares en 2014, resultado de 278 millones de pedidos de compra (Batarfi *et al.*, 2017).

Se estima que en el *e-commerce*, existe un flujo inverso promedio entre el 20% y el 25% de las operaciones totales, llegando incluso a valores del 40% para algunos productos como las prendas de vestir (Pan *et al.*, 2015) o del 50% de las ventas en la campaña navideña (El Mundo, 2019). Por todo ello, en el mercado global, y especialmente en el del comercio electrónico, cada vez es más importante la gestión de la LI (Qian *et al.*, 2012), pues de una buena gestión de la LI dependerá gran parte de la rentabilidad de la empresa.

Actualmente, **pocas compañías cuentan con estrategias apropiadas** destinadas a gestionar el retorno de productos y muchas de ellas aún tienden a ignorarlo, ancladas en el enfoque convencional de CdS tradicional o hacia delante (Shaharudin *et al.*, 2017). Comprender y **desarrollar técnicas de gestión de productos al final de su vida útil**, es crucial en la mitigación de los efectos negativos que se producen diariamente sobre el medio ambiente (Gungor y Gupta, 1999), sirviendo además para mejorar la imagen de marca, generar ingresos, fidelizar a los clientes y reducir costes (Qiang *et al.*, 2013, Pochampally y Gupta, 2004).

Este panorama de crecimiento vertiginoso de las operaciones relacionadas con la LI, debido a las recuperaciones y las devoluciones de productos, provoca que **la gran mayoría de las empresas están tratando de encontrar la mejor manera de gestionar estratégicamente sus procesos de logística inversa (PLI)** (Tibben-Lembke y Rogers, 2002).

Ante esta situación, **una línea de trabajo a desarrollar es la formalización de los PLI**, consistente en establecer responsabilidades claramente definidas y estandarizar los procedimientos y las operaciones de gestión del proceso. La falta de formalización y

estandarización del PLI puede ser perjudicial, puesto que el objetivo general puede ser declarado por la alta dirección, pero los pasos intermedios de cómo se supone que funciona realmente el proceso pueden delegarse sin un consenso claro por parte de quién tiene que ejecutar las operaciones necesarias (Huscroft *et al.*,2013).

La formalización del proceso de LI debe convertirse, por tanto, en prioridad para toda compañía, pudiendo llegar incluso a ser una ventaja competitiva clara y permitiendo obtener los siguientes beneficios: reducción de errores y de costes del proceso, facilidad de obtener indicadores y beneficios, cumplimiento de la legislación y mejora de la imagen de la empresa.

Junto a la formalización del proceso, otra línea de trabajo fundamental es la mejora en la **eficiencia del proceso**. Una manera de lograr esa eficiencia es a través de una toma de decisiones ágil y flexible. Los decisores, en este contexto, necesitan herramientas de ayuda que les aporten una respuesta rápida y acertada, permitiéndoles ofrecer una decisión en tiempo real al cliente cuando éste lo requiera.

A parte de la incertidumbre asociada a los productos recuperados, uno de los problemas de este tipo de decisiones es que se debe manejar mucha información influenciada por diversos factores e intereses. Por ello, el uso de herramientas matemáticas permite a los decisores afrontar el reto de tomar una solución rápida y eficiente teniendo en cuenta gran cantidad de información.

Las ventajas que aporta una toma de decisiones eficiente se centran, principalmente, en la reducción de costes, el aprovechamiento del valor de los productos, el incremento de los beneficios y la mejora de la relación con el cliente.

Por el contrario, los problemas que puede causar a la compañía una ineficiente toma de decisiones se resumen en la pérdida de confianza por parte de los clientes y en un desaprovechamiento de los productos para generar beneficio a la empresa.

Una tercera línea de trabajo para la mejora del PLI es la sostenibilidad. Los procesos sostenibles son la base del **enfoque de la sostenibilidad** en las empresas y, por lo tanto, tienen una gran repercusión en los aspectos, no solo ambientales, sino también económicos y sociales.

A pesar de que el PLI ya nace en un contexto de sostenibilidad, para que sea realmente sostenible el proceso, sus decisiones deberán valorarse desde el triple enfoque de sostenibilidad mencionado. Habitualmente la medición del impacto de las decisiones con respecto a la dimensión económica suele ser una práctica común y, desde principios del siglo XXI, la dimensión ambiental está cada vez más presente en las decisiones del PLI, en cambio, la dimensión social ha recibido menos atención, tanto en la literatura como en la práctica, no siendo considerada en gran parte de los casos.

Pasar por alto la dimensión social de la sostenibilidad puede suponer un grave impacto adverso sobre la CdS, principalmente por su desafección sobre los empleados y sobre la sociedad en la que opera, impidiendo que las decisiones sean verdaderamente sostenibles al no ser consideradas las tres dimensiones.

Las investigaciones actuales para la gestión de la LI se centran, mayoritariamente, en el diseño y configuración de la red, tanto para la recuperación de productos como para la composición de una CdS de bucle cerrado, planteando soluciones para PLI concretos, sin entrar a detallar una formalización clara del proceso ni, mucho menos, de las decisiones de disposición a adoptar en el PLI. Los enfoques existentes, tampoco ofrecen un análisis de las decisiones desde una triple dimensión sostenible, pues la dimensión social suele ser obviada en la gran mayoría de casos. Es por ello, que se precisa proporcionar a las empresas las herramientas adecuadas que les permita formalizar sus PLI, adoptando decisiones de manera eficiente y desde un enfoque sostenible.

En la sección 1.2 se muestra el planteamiento del problema a través de la descripción de las necesidades detectadas y se plantean preguntas de investigación que justifican la necesidad de la tesis. En la sección 1.3 se exponen los objetivos de la tesis, primero de manera general, y después, pormenorizados según las partes de la tesis. Por último, en la sección 1.4 se describe la estructura de la tesis y se explica el contenido de cada capítulo.

## **1.2. Planteamiento del problema y necesidad de la Tesis**

Tradicionalmente, la LI se define como el proceso de planificación, desarrollo y control de los flujos de retorno, de las materias primas, productos en curso, envases y embalajes y productos finales, desde su fabricación, distribución o uso, hasta su lugar de recuperación o de su correcta eliminación (De Brito y Dekker, 2004) *The European Group on Reverse Logistic*.



Los problemas asociados a la gestión de la LI se exponen a continuación.

### ***El PLI no está formalizado***

Ante la importancia, cada vez mayor, que está teniendo la LI, las empresas se ven en la necesidad de poner orden en sus procesos. En muchos casos, el PLI no está documentado ni modelado (Huscroft *et al.*, 2013) y gran cantidad de datos relativos al proceso no existen, o existen pero no se actualizan. Por lo tanto, no se controla si la toma de decisiones es la más apropiada para cada caso concreto. A consecuencia de estos aspectos, el PLI no se ejecuta siempre de la misma manera, resultando ineficiente para la compañía. De hecho, en la revisión de los enfoques de modelos de negocio que aportan mejoras de sostenibilidad y de EC realizada por Pieroni *et al.*, (2019) queda en evidencia que los trabajos abordan etapas individuales sin ser considerados los procesos de manera integral por los investigadores.

Además, la elevada incertidumbre que caracteriza la LI hace que sea más compleja que la LD o tradicional, por ello, la gestión de la información correspondiente al flujo inverso es esencial para su correcto funcionamiento (Poole, 2003).

En este sentido, resulta fundamental manejar **adecuadamente toda la información correspondiente a cada situación a través de un PLI formalizado** (Huscroft *et al.*, 2013), estableciendo una serie de reglas, procedimientos y comunicaciones, que faciliten la comprensión de todos los interesados y les ayude a saber cómo actuar en cada momento. Dicha formalización permite una mejor comprensión y gestión de las devoluciones de productos y una LI más eficiente, que puede a su vez proporcionar una ventaja competitiva en la compañía (Agrawal *et al.*, 2015).

### ***La DD es una decisión compleja e importante***

A raíz de la definición anterior sobre la LI, se puede **entender que la LI es un concepto muy amplio y diverso**, debido a que puede ser generada por distintos desencadenantes, como las devoluciones o la recuperación de los productos y sus componentes. Por otra parte, cuando se inicia el PLI, se debe abordar una decisión compleja por parte de los decisores: elegir qué tratamiento aplicar a cada producto

y a sus componentes. Esta decisión es referenciada o conocida en español como la *decisión sobre el tratamiento a aplicar*, aunque en la literatura científica es conocida como ***Disposition Decision (DD)*** (Agrawal y Singh, 2019; Agrawal *et al.*, 2016; Farahani *et al.*, 2019; Hazen *et al.*, 2012; Krikke, 2011; Krumwiede y Sheu, 2002; Souza, 2013). Esta expresión en inglés se traduciría literalmente al español *decisión sobre disposición*. Se entiende que estas expresiones, “decisión sobre disposición del producto”, *disposition decision (DD)* y “decisión sobre el tratamiento a aplicar al producto” son similares y que hacen referencia a la misma decisión clave, por lo que se utilizarán indistintamente ambos términos a lo largo de la tesis.

A este respecto, la empresa cuenta generalmente con diferentes opciones de disposición o tratamiento, desde revenderlos tal cual estén, pasando por repararlos o modificarlos para volver a introducirlos en el mercado, donarlos, desmontarlos para aprovechar todos o algunos de sus componentes, hasta desecharlos de manera controlada y regulada.

Bajo un clima de incertidumbre elevado, en cuanto a cantidad, calidad, lugar y tiempo se refiere, el hecho de que una entidad decida darle un camino u otro al producto recuperado dependerá de diferentes aspectos, tanto relativos al producto (desgaste, desperfectos, estado de los componentes, posible rentabilidad económica, ...), como al mercado (demanda, utilidad para los clientes, mercado en el que se encuentra, legislación, impacto ambiental y social, ...).

De cualquier forma, la intención será tratar de aprovechar al máximo la vida residual que le pudiera quedar al producto o a sus componentes. Una mala disposición del producto puede causar grandes problemas a la empresa (incumplimiento de la ley, desaprovechamiento del valor de los productos, pérdidas económicas, mala imagen y empeoramiento de la relación con el cliente) y a la sociedad (mayor impacto ambiental y disminución de la cohesión social).

El problema es que, para tomar **una DD eficiente**, se debe tener en cuenta mucha información, sobre diferentes aspectos, que además debe estar actualizada. En muchas ocasiones se precisa tomar una decisión rápida y acertada, contando únicamente para ello con la descripción que aporta el cliente sobre el problema.

Otras veces, intentando simplificar el problema, se recurre a tomar una decisión fija o estándar, porque es la solución que “se ha dado siempre a estos casos”.

***No existen apenas modelos de referencia***

Por otra parte, el diseño de un PLI requiere pensar a largo plazo, ya que muchas de las decisiones tomadas tienen profundas implicaciones ambientales y sociales (Stark *et al.*, 2017), aparte de las económicas. Sin embargo, a pesar de la potencial rentabilidad de la LI, no existen numerosos modelos de decisión integrados que asesoren a los decisores sobre la viabilidad económica de las alternativas de tratamiento de LI (Wee Kwan Tan y Kumar, 2006), y mucho menos que integren la dimensión ambiental y social en sus decisiones.

***No se suele tener en cuenta la dimensión social***

Aunque estas tres dimensiones de la sostenibilidad sean conflictivas entre ellas muchas veces (Dehghanian y Mansour, 2009), este equilibrio multidimensional es imprescindible para alcanzar sistemas más rentables, más respetuosos con el medio ambiente y más preocupados por la sociedad (Garetti y Taisch, 2012), permitiendo el cambio de modelo de negocio de las empresas hacia un enfoque más sostenible.

En definitiva, los problemas detectados se podrían agrupar en los siguientes tres apartados:

- **Falta de estandarización y formalización del PLI**
- **Ineficiencia en la toma de decisiones sobre la DD**
- **Falta de consideración de factores ambientales y, sobre todo, sociales en las decisiones de LI y, especialmente, en la DD.**

A partir de estos tres problemas, se ofrece un planteamiento general de la tesis, dos preguntas generales de investigación y tres cuestiones específicas, que se abordan en diferentes partes de la tesis y engloban todo el conjunto de problemas identificado:

**Planteamiento general de investigación:**

- **¿PODRÍA CREARSE UN MARCO DE REFERENCIA QUE INTEGRASE LA FORMALIZACIÓN DEL PLI Y EL DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE AYUDA PARA LA TOMA DE LA DD DESDE UN ENFOQUE EFICIENTE Y SOSTENIBLE?**

**Preguntas generales de investigación:**

- **¿CÓMO SE PODRÍA FORMALIZAR O ESTANDARIZAR EL PROCESO DE LI EN UNA EMPRESA?**
- **¿CÓMO SE PODRÍA AYUDAR A UNA EMPRESA A TOMAR LA DD DE LA MANERA MÁS EFICIENTE Y SOSTENIBLE POSIBLE?**

**Cuestiones específicas:**

- **¿PODRÍA DESCRIBIRSE DE FORMA ESPECÍFICA UNA METODOLOGÍA QUE DÉ SOPORTE Y GUÍE A LAS EMPRESAS QUE PRETENDAN TOMAR LA DD DE LA MANERA MÁS EFICIENTE Y SOSTENIBLE POSIBLE?**
- **¿PODRÍA DESARROLLARSE UNA HERRAMIENTA QUE EVALÚE LAS DISTINTAS ALTERNATIVAS POSIBLES ANTE LA DD EN BASE A FACTORES ECONÓMICOS, AMBIENTALES Y SOCIALES?**
- **¿QUÉ TIPO DE INFORMACIÓN NECESITARÍA UTILIZAR LA EMPRESA PARA PODER TOMAR LA DD DE MANERA SOSTENIBLE Y EFICIENTE?**

Precisamente, el planteamiento general de investigación, que engloba toda la problemática anteriormente expuesta, justifica el desarrollo de la presente tesis doctoral con el fin de que se puedan desarrollar PLI, integrados con herramientas de ayuda a la toma de la DD basadas en modelos matemáticos, y adaptados a la casuística particular de cada empresa.

### 1.3. Objetivos de la Tesis

El **principal objetivo** de esta tesis es diseñar un Marco de Referencia que permita mejorar la gestión de los productos devueltos o recuperados, combinando los conceptos de la gestión de procesos de negocio, que faciliten la formalización del PLI, con herramientas de modelado matemático, que favorezcan una toma de decisiones eficiente y sostenible. Además, se pretende que dicho Marco de Referencia permita el desarrollo de procesos y modelos matemáticos adaptados a cada caso particular, no solo favoreciendo el entendimiento y la incorporación del PLI, sino facilitando el cambio de todo modelo de negocio con LI hacia modelos más sostenibles.

El Marco de Referencia, planteado como núcleo principal de la tesis, abarca los objetivos identificados con respecto a los tres grandes bloques siguientes:

- Respecto a la **formalización del proceso**:
  - I. Identificar las actividades que forman parte del PLI para ayudar a las empresas a definir sus procesos de logística inversa, documentarlos y adaptarlos a la realidad de cada caso.
- Respecto a la **eficiencia en las decisiones**:
  - II. Desarrollar herramientas de ayuda a la toma de decisiones, basada en MM para ayudar al decisor a tomar las mejores decisiones en cada situación.
- Respecto a la **sostenibilidad en las decisiones**:
  - III. Tomar las decisiones con el mayor grado de sostenibilidad posible, considerando las tres dimensiones: económica, ambiental y social.

A continuación, se recogen y se enumeran los objetivos que se pretenden alcanzar con la presente tesis, según las partes de la misma:

- Objetivos genéricos del **estado del arte**:
  1. Verificar la existencia o inexistencia de marcos de referencia, herramientas o metodologías que aporten una formalización del proceso de Logística Inversa, abordando la problemática de la eficiencia de la toma de decisiones y la sostenibilidad en la decisión sobre la disposición.
  2. Realizar un estado del arte sobre las áreas consideradas fundamentales en cuanto a la problemática que se desea abordar. Estas áreas son: a) Logística

- Inversa, b) El proceso de Logística Inversa y c) Decisión sobre la disposición de productos de Logística Inversa (DD).
3. Analizar los puntos abordados, mayoritariamente, en los trabajos que abordan la problemática sobre la DD en el ámbito de la Logística Inversa.
- **Objetivos respecto a la parte del estado del arte sobre Logística Inversa:**
    4. Presentar el concepto de Logística Inversa a través de las principales definiciones, seleccionando la definición más acorde con el contenido del trabajo.
    5. Identificar los sectores industriales más representativos en los que se da la LI.
    6. Exponer y diferenciar las tipologías más comunes de sistemas de Logística Inversa.
  - **Objetivos respecto a la parte del estado del arte sobre decisiones en el proceso de Logística Inversa:**
    7. Mostrar una visión general del PLI que permita identificar las etapas principales del mismo, reforzado por la descripción de los posibles eventos de inicio del proceso y de los posibles tratamientos aplicables a los productos recuperados o devueltos en un ámbito de LI.
    8. Identificar las principales decisiones del PLI a través de una revisión bibliográfica en el ámbito de la LI.
    9. Inferir las decisiones clave en el proceso de LI a partir de las variables de decisiones de los modelos matemáticos en un contexto de LI.
    10. Describir las decisiones clave de la LI, agrupadas inicialmente por similitud.
  - **Objetivos respecto a la parte del estado del arte sobre la decisión de disposición del producto:**
    11. Justificar el interés por el estudio de la DD.
    12. Razonar la importancia del estudio de aspectos económicos, ambientales y sociales a considerar en la DD, desde un enfoque sostenible.
    13. Justificar el uso de las herramientas matemáticas para conseguir una toma de decisiones eficiente en el contexto de la LI.
    14. Revisar la bibliografía de los principales modelos matemáticos diseñados en el ámbito de la toma de decisiones sobre alternativas de disposición.

- Objetivos respecto a la parte de **la descripción del problema y líneas de actuación:**
  15. Describir detalladamente el problema a resolver y mostrar la trascendencia de este.
  16. Aportar una propuesta de solución para cada bloque de problemas y una propuesta de solución integrada para resolver el problema en todo su ámbito.
- Objetivos respecto a la parte de la **propuesta de Marco de Referencia:**
  17. Proponer un Marco de Referencia que sirva de base para la formalización del PLI, adaptado a empresas concretas, y para la elaboración de una herramienta matemática de ayuda a la toma de decisiones integrada en él.
  18. Identificar las necesidades que debe cubrir el Marco de Referencia y los bloques que lo componen, así como la relación entre necesidades y bloques.
- Objetivos respecto a la parte de la **propuesta de modelo genérico del PLI:**
  19. Relacionar las causas que activan el proceso de LI con respecto a las diferentes alternativas de disposición de productos.
  20. Aportar información característica sobre las decisiones clave, tal como su ubicación sobre configuraciones genéricas.
  21. Proponer un modelo genérico del PLI que facilite la formalización del proceso
- Objetivos respecto a la parte de la **propuesta del modelo matemático:**
  22. Definir el problema a resolver de manera estructurada como un problema de optimización multi-objetivo modelado a través de programación lineal
  23. Identificar los aspectos económicos, ambientales y sociales referentes a cada uno de los distintos tratamientos de LI.
  24. Describir un modelo matemático de aplicación para facilitar la elección de la alternativa de disposición más adecuada.
- Objetivo respecto a la parte de la **propuesta del proceso de solución:**
  25. Describir y justificar el proceso de solución para obtener la mejor alternativa de disposición de LI.
- Objetivos respecto a la parte de la **validación mediante experimentación:**

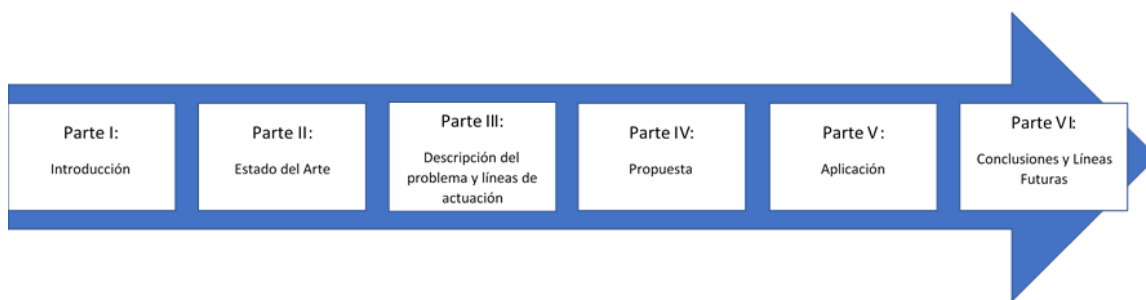
26. Mostrar los requerimientos necesarios para cuantificar la rentabilidad económica, ambiental y social de las diferentes alternativas.
  27. Validar el correcto funcionamiento del modelo matemático propuesto, mediante experimentación con baterías de valores económicos, ambientales y sociales.
  28. Validar el proceso de solución propuesto para determinar la mejor disposición del producto bajo un enfoque de optimización multi-objetivo
- **Objetivo respecto a la parte de la **propuesta del modelo genérico del PLI con el subproceso de solución y modelo matemático genérico:****
    29. Proponer un modelo genérico del PLI, incorporando en él el proceso de solución de la herramienta matemática, como un subproceso clave.
  - **Objetivo respecto a la parte de la **propuesta del modelo particular del PLI con el subproceso de solución y modelo matemático particular:****
    30. Definir la metodología para adaptar los modelos genéricos anteriormente expuestos a cada caso concreto de empresa y/o CdS.
  - **Objetivos respecto a la **aplicación del Marco de Referencia:****
    31. Verificar la validez de las propuestas desarrolladas y mostrar su adaptabilidad en dos ejemplos de aplicación reales con tipos de LI diferentes.
    32. Obtener un PLI adaptado a cada caso particular
    33. Identificar las circunstancias que hacen más conveniente una alternativa u otra en la DD, determinando cuál sería la disposición más adecuada para cada caso.

En definitiva, el objetivo de este trabajo es desarrollar un Marco de Referencia que sirva de ayuda en la creación y gestión del PLI genérico, combinando el modelado de procesos y el modelado matemático. El modelado de procesos serviría más de ayuda en la definición y creación del PLI mientras que, una vez creado, el modelado matemático ayudaría en la gestión de cada caso concreto de LI, facilitando la eficiencia y la sostenibilidad en la DD.

#### **1.4. Estructura de la Tesis**

La estructura general de la tesis se compone de seis partes principales que quedan representadas en la siguiente figura:





**Figura 1.** Estructura general de la Tesis (Elaboración propia)

Las seis partes en las que está estructurada la tesis engloban diecisiete capítulos, el contenido de los cuales se expone a continuación:

## PARTE I. INTRODUCCIÓN

### Capítulo 1. Introducción.

Se plantea una breve visión de la actualidad de la LI, junto con la exposición del problema propuesto y el planteamiento de los objetivos a conseguir a través de la realización de la tesis.

### Capítulo 2. Metodología de Investigación

Se justifica el enfoque de investigación utilizado para la realización del trabajo y muestra la adaptación de las fases de la metodología de investigación al presente estudio, marcando la relación de cada fase con los capítulos y los resultados obtenidos en la tesis.

## PARTE II. ESTADO DEL ARTE

### Capítulo 3. Logística Inversa

Se presenta el concepto de Logística Inversa, ofreciendo cómo ha evolucionado la definición a lo largo del tiempo, cuáles son los principales sectores en los que se existe LI y los tipos más habituales según el flujo del producto, diferenciando entre LI de lazo abierto y de lazo cerrado. Este capítulo de la tesis sirve como antesala para contextualizar mejor las características del Proceso de LI que se muestran en el capítulo siguiente.

#### Capítulo 4. Proceso de Logística Inversa

Se muestra una visión general del PLI donde se especifican las principales etapas a seguir en un contexto genérico de LI. Además, identifica las principales causas que inician el proceso de LI, organizándolas como Logística de devoluciones y como Logística para la recuperación de productos. Además, expone razonadamente todos los posibles tratamientos aplicables a los productos de LI

Se revisa la bibliografía en cuanto a las decisiones clave en el ámbito de la LI, describiendo detalladamente cada tipo de decisión identificada según los modelos matemáticos utilizados en el ámbito de la LI. Posteriormente se razona sobre la influencia de cada decisión clave de LI en el éxito de la empresa.

Esta identificación de las decisiones es fundamental para poder determinar que la decisión de disposición es la más importante en el PLI y, por lo tanto, será la decisión clave sobre la que se desarrollará la propuesta de la tesis doctoral.

#### Capítulo 5. Decisión sobre Disposición del Producto

Se justifica el interés del estudio en la DD, argumentando las razones que convierten dicha decisión en la más importante y compleja dentro del PLI. Posteriormente, se describen los principales aspectos a tener en cuenta en la DD, los aspectos económicos, ambientales y sociales.

Se contextualiza la DD, argumentando su importancia y su complejidad, justificando la necesidad del estudio sobre dicha decisión, realizado en el capítulo siguiente.

### PARTE III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y LÍNEAS DE ACTUACIÓN

#### Capítulo 6. Descripción del Problema y líneas de actuación

Se describe el problema a resolver, desglosándolo en tres grandes bloques: falta de formalización del PLI, problemas de eficiencia en la toma de la DD y falta de una visión completa de sostenibilidad con respecto a la DD. Se plantea una línea de actuación basada en el modelado de procesos para el primer bloque y otra línea centrada en el modelado matemático para afrontar los otros dos bloques. Además, se establece una tercera línea que combina ambos tipos de modelado para afrontar el problema en todo su ámbito.

La solución integrada propuesta se basa en el desarrollo de un Marco de Referencia que se explica con detalle en la parte siguiente.

#### PARTE IV. PROPUESTA

##### Capítulo 7. Propuesta de Marco de Referencia

Se propone un Marco de Referencia que pretende abarcar los tres grandes bloques que componen el problema detectado. Para ello, se indican las necesidades que debe cubrir el marco y se exponen los bloques que lo componen, marcando la relación de cada bloque para satisfacer cada una de las necesidades. Posteriormente, se muestra el Marco de Referencia con los bloques que lo componen y se explican los pasos para progresar entre ellos.

Finalmente se introducen tres ejes sobre el Marco de Referencia para ayudar a estructurarlo y entenderlo. Estos ejes dividen el marco en la visión de modelado, la visión integrada y la visión genérica o particular.

Los bloques que componen el Marco de Referencia son explicados detalladamente a lo largo de los capítulos siguientes.

##### Capítulo 8. Bloque I - Modelo genérico del PLI

Se relacionan las causas que generan la LI con las distintas alternativas de tratamiento de productos existentes, identificando la relación en función de si es habitual o no. Posteriormente, se ubican las decisiones clave del PLI sobre un modelo genérico de CdS Inversa para ayudar a formalizar y estructurar el proceso.

A partir de toda la información anterior, se propone un modelo genérico del PLI en el que, además, se puede apreciar el momento en el que se toman las decisiones clave del proceso.

El segundo bloque del Marco de Referencia se presenta a lo largo de los tres capítulos siguientes.

##### Capítulo 9. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Modelo Matemático

Se plantea el problema a resolver de manera estructurada, como un problema de optimización multi-objetivo modelado a través de programación lineal. Se

identifican los aspectos de sostenibilidad referentes a cada una de las posibles alternativas de disposición.

Se describe el modelo matemático que se propone como elemento de la herramienta matemática genérica de ayuda para la toma de la DD. Se exponen los componentes del modelo, mostrando los índices, los parámetros, las variables de decisión, las funciones objetivo y las restricciones que lo componen.

Una vez expuesto el modelo matemático, se considera fundamental la explicación del proceso de solución, el otro elemento de la herramienta matemática genérica, que se llevará a cabo en el capítulo siguiente.

#### Capítulo 10. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Proceso de solución

Se explica detalladamente el funcionamiento del proceso de solución para encontrar la mejor alternativa, justificando previamente el método de resolución a utilizar.

Tras mostrar los componentes de la herramienta matemática genérica, se valida el correcto funcionamiento de la misma a través del capítulo siguiente.

#### Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

Se muestra los pasos para validar, mediante experimentación, el modelo matemático y el proceso de solución propuestos en los capítulos anteriores. Se experimenta mediante una serie de baterías de valores económicos, ambientales y sociales, cómo se selecciona la alternativa más adecuada. Posteriormente se valida el proceso de solución, mediante distintas ponderaciones de los parámetros económicos, ambientales y sociales.

Con la explicación del modelo matemático y el proceso de solución, junto con la validación de ambos elementos, se cierra la presentación del Bloque II, centrado en la herramienta matemática genérica. En el capítulo siguiente se expone el Bloque III, en el que el proceso de solución se convierte en un subproceso del Modelo del PLI.

Capítulo 12. Bloque III – Modelo genérico integrado

Se combina el modelado de procesos con el modelado matemático para ofrecer una solución integrada. Se incluye el proceso de solución de la herramienta matemática dentro del modelo de procesos como un subproceso del modelo genérico del PLI. Con este Bloque, se completa la visión genérica del Marco de Referencia diseñado.

Capítulo 13. Metodología de adaptación y Bloque IV – Modelo particular integrado

Se muestran los pasos que componen la metodología de adaptación del modelo genérico integrado a cada caso concreto, constituyendo el modelo particular integrado.

PARTE V. APLICACIÓN

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de Sillones de Relax

Se aplica el Marco de Referencia para el diseño de un PLI adaptado a un ejemplo de LI de lazo cerrado, concretamente en una empresa productora de sillones de relax, obteniéndose el modelo particular del PLI con el subproceso de solución, y el modelo matemático particular para el ejemplo de aplicación.

Se cuantifican los valores económicos, ambientales y sociales de cada posible alternativa de tratamiento y se ejecuta el subproceso de solución para este caso concreto. Posteriormente, se analizan y se discuten los resultados obtenidos.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de Neumáticos Usados

Se utiliza una planta de tratamiento de neumáticos usados para aplicar el Marco de Referencia propuesto sobre un ejemplo real de LI de lazo abierto. Se adaptan los modelos genéricos a modelos particulares aplicando la metodología diseñada dentro del Marco de Referencia. Se obtienen los valores económicos, ambientales y sociales de cada una de las alternativas de este caso real y se ejecuta el subproceso de solución para obtener la alternativa más adecuada en varios ejemplos reales. Finalmente, se valoran los resultados obtenidos y se reflexiona sobre la variación de la alternativa escogida según cada caso concreto.

## PARTE VI. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

### Capítulo 16. Conclusiones

Se muestra un resumen de las conclusiones que se han alcanzado con el presente trabajo y se realiza una valoración con respecto a los objetivos planteados inicialmente. Además, se reflejan las limitaciones detectadas a lo largo de la investigación.

### Capítulo 17. Líneas futuras de Investigación

Se especifican las posibles líneas futuras de investigación que se han abierto a raíz de este trabajo.

## **1.5. Referencias**

- Agrawal, S., y Singh, R. K. (2019). Analyzing disposition decisions for sustainable reverse logistics: Triple Bottom Line approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 150, 104448. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104448>
- Agrawal, S., Singh, R. K., y Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 76-92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>
- Agrawal, S., Singh, R. K., y Murtaza, Q. (2016). Disposition decisions in reverse logistics: Graph theory and matrix approach. *Journal of Cleaner Production*, 137, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.045>
- Cárdenas, I., Beckers, J., y Vanelslander, T. (2017). E-commerce last-mile in Belgium: Developing an external cost delivery index. *Research in Transportation Business and Management*, 24, 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.07.006>
- De Brito, M. P., & Dekker, R. (2004). A Framework for Reverse Logistics. *Reverse Logistics*, 3-27. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-24803-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24803-3_1)
- Dehghanian, F., & Mansour, S. (2009). Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(10), 559-570. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2009.04.007>
- El Mundo. (2019). Las devoluciones online le pasan factura al comercio: tres de cada 10 productos se “pierden” | Ahorro y Consumo. Retrieved October 2, 2019, from

<https://www.elmundo.es/economia/ahorro-y-consumo/2019/01/13/5c389b2b21efa0d0688b46d6.html>

- Farahani, S., Otieno, W., & Barah, M. (2019). Environmentally friendly disposition decisions for end-of-life electrical and electronic products: The case of computer remanufacture. *Journal of Cleaner Production*, 224, 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.182>
- Forrest, A., Hilton, M., Ballinger, A., & Whittaker, D. (2017). Circular Economy Opportunities in the Furniture Sector. *European Environmental Bureau (EEB)*, 55. Brussels, Belgium. Retrieved from <file:///C:/Users/giuli/Desktop/Circular-Economy-in-the-Furniture-Sector.pdf>
- Garetti, M., & Taisch, M. (2012). Sustainable manufacturing: Trends and research challenges. *Production Planning and Control*, 23 (2–3), 83–104. <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.591619>
- Gobierno de España. (2017). Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017 - 2020, 1–55. Retrieved from <papers2://publication/uuid/833191B9-AF6F-41AB-BA8A-B8675AF01D0C>
- Gungor, A., & Gupta, S. M. (1999). Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: A survey. *Computers and Industrial Engineering*, 36(4), 811–853. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00167-9)
- Han, X., Wu, H., Yang, Q., & Shang, J. (2016). Reverse channel selection under remanufacturing risks: Balancing profitability and robustness. *International Journal of Production Economics*, 182, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.013>
- Hanafi, J., Kara, S., & Kaebernick, H. (2008). Reverse logistics strategies for end-of-life products. *The International Journal of Logistics Management*, 19(3), 367–388. <https://doi.org/10.1108/09574090810919206>
- Hazen, B. T., Hall, D. J., & Hanna, J. B. (2012). Reverse logistics disposition decision-making: Developing a decision framework via content analysis. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 42(3), 244–274. <https://doi.org/10.1108/09600031211225954>
- Huscroft, J. R., Hazen, B. T., Hall, D. J., Skipper, J. B., & Hanna, J. B. (2013). Reverse logistics: Past research, current management issues, and future directions. *International Journal of Logistics Management*, 24(3), 304–327. <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2012-0024>
- Krikke, H. (2011). Impact of closed-loop network configurations on carbon footprints: A case

- study. *Resources, Conservation and Recycling*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344911001443>
- Krumwiede, D. W., & Sheu, C. (2002). A model for reverse logistics entry by third-party providers. *Omega*, 30(5), 325–333. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(02\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(02)00049-X)
- Pan, S., Chen, C., & Zhong, R. Y. (2015). A crowdsourcing solution to collect e-commerce reverse flows in metropolitan areas. *IFAC-PapersOnLine*, 28, 1984–1989. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.379>
- Pieroni, M. P. P., McAloone, T. C., & Pigosso, D. C. A. (2019). Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.036>
- Pochampally, K. K., & Gupta, S. M. (2004). A business-mapping approach to multi-criteria group selection of collection centers and recovery facilities. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2004. Conference Record. 2004*, 249–254. <https://doi.org/10.1109/ISEE.2004.1299724>
- Pokharel, S., & Mutha, A. (2009). Perspectives in reverse logistics: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(4), 175–182. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.11.006>
- Poole, K. (2003). Seizing the potential of the service supply chain. *Supply Chain Management Review*, V. 7, NO. 4(. Retrieved from <https://trid.trb.org/view.aspx?id=606663>
- Prakash, C., & Barua, M. K. (2016). A combined MCDM approach for evaluation and selection of third-party reverse logistics partner for Indian electronics industry. *Sustainable Production and Consumption*, 7, 66–78. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.04.001>
- Qian, X., Han, Y., Da, Q., & Stokes, P. (2012). Reverse logistics network design model based on e-commerce. *International Journal of Organizational Analysis*, 20(2), 251–261. <https://doi.org/10.1108/19348831211227864>
- Qiang, Q., Ke, K., Anderson, T., & Dong, J. (2013). The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties. *Omega*, 41(2), 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2011.08.011>
- Ravi, V., Shankar, R., & Tiwari, M. (2005). Analyzing alternatives in reverse logistics for end-of-life computers: ANP and balanced scorecard approach. *Computers & Industrial Engineering* 48 (2), 327-356.
- Shaharudin, M. R., Govindan, K., Zailani, S., Tan, K. C., & Iranmanesh, M. (2017). Product



- return management: Linking product returns, closed-loop supply chain activities and the effectiveness of the reverse supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1144–1156. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.133>
- Souza, G. C. (2013). Closed-Loop Supply Chains: A Critical Review, and Future Research. *Decision Sciences*, 44(1), 7–38. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2012.00394.x>
- Stark, R., Seliger, G., & Bonvoisin, J. (2017). *Sustainable manufacturing : challenges, solutions and implementation perspectives*. Springer Nature. Retrieved from [https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=Sustainable+Manufacturing+Challenges%2C+Solutions+and+Implementation+Perspectives&btnG=](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Sustainable+Manufacturing+Challenges%2C+Solutions+and+Implementation+Perspectives&btnG=)
- Steenek, D. W., & Sarin, S. C. (2013). Pricing and production planning for reverse supply chain: A review. *International Journal of Production Research*, 51 (23-24), 6972-6989. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.836780>
- Tibben-Lembke, R. S., & Rogers, D. S. (2002). Differences between forward and reverse logistics in a retail environment. *Supply Chain Management: An International Journal*, 7(5), 271–282. <https://doi.org/10.1108/13598540210447719>
- Wee Kwan Tan, A., & Kumar, A. (2006). A decision-making model for reverse logistics in the computer industry. *International Journal of Logistics Management*, 17(3), 331–354. <https://doi.org/10.1108/09574090610717518>

## **Capítulo 2. Metodología de Investigación**

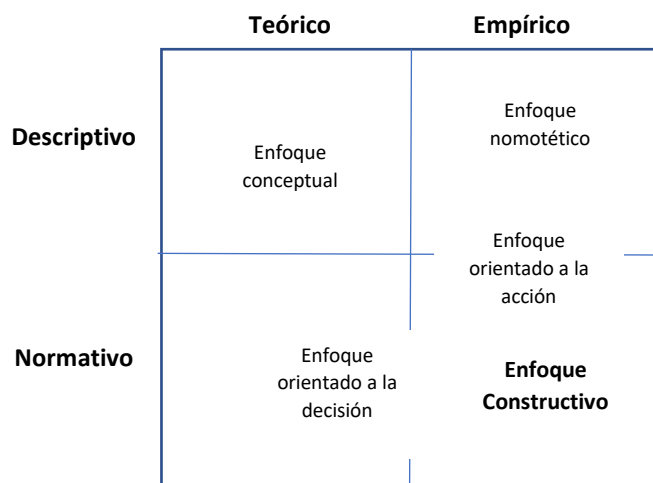
## 2.1. Introducción

La metodología de investigación marca las pautas a seguir para realizar el trabajo de investigación. La investigación europea de finales de siglo XX, centrada en la gestión económica, adoptó ampliamente la clasificación de enfoques de investigación realizada por Neilimo y Näsi (1980). Dicha clasificación constaba inicialmente de cuatro enfoques: **el nomotético, el orientado a la decisión, el orientado a la acción y el conceptual**. Posteriormente, esta clasificación de enfoques metodológicos es utilizada por Kasanen *et al.* (1993), como base para su análisis, consiguiendo añadir un nuevo enfoque empírico normativo que se complementa con los cuatro enfoques anteriores. Se trata del denominado **enfoque constructivo**, el cual fue ideado para alentar a los académicos a tomar un papel más activo en la mejora de los problemas prácticos existentes (Rautiainen *et al.*, 2017).

En lo que respecta a la clasificación de Neilimo y Näsi (1980), el enfoque constructivo tiene mucho en común con el orientado a la toma de decisiones. En ambos casos un análisis teórico desempeña un papel importante que conduce a la creación de una nueva entidad. Sin embargo, el enfoque orientado a la toma de decisiones generalmente usa el método de deducción, mientras que las innovaciones heurísticas son características del enfoque constructivo. La principal diferencia radica en el hecho de que el enfoque constructivo, siempre implica un intento de demostrar explícitamente la usabilidad práctica de la solución construida.

Por lo tanto, un estudio orientado a la toma de decisiones que abarque una implementación exitosa puede corresponder también a un estudio basado en el enfoque constructivo (Rautiainen *et al.*, 2017). Neilimo y Näsi (1980) ubican estos enfoques de acuerdo con su énfasis principal en dos ejes: teórico-empírico y descriptivo-normativo.

De esta forma, el enfoque constructivo de investigación se sitúa en el cuadrante inferior derecho, debido a que se caracteriza por ser normativo y empírico (ver Figura 2).



**Figura 2.** Clasificación de enfoques de investigación y localización del enfoque constructivo (adaptada de Neilimo y Näsi, 1980 y Kasanen *et al.*, 1993)

Los modelos normativos corresponden a la optimización matemática o resolución de problemas mediante heurísticas y los empíricos aplican la innovación a un caso real para resolver un problema específico.

Según Lukka (2000) y Lukka (2005), el objetivo del enfoque de investigación constructiva es aportar una solución a un problema práctico a través de planteamientos innovadores, con alto valor teórico y práctico.

En línea con los objetivos planteados en el capítulo anterior, la presente tesis es considerada como una investigación aplicada (práctica o empírica) puesto que pretende adquirir nuevos conocimientos que sean de aplicación práctica, facilitando resultados concretos y eminentemente prácticos. Se trata de un nivel de investigación referente a la investigación tecnológica en la que se elaboran métodos o herramientas específicas aplicadas.

En base a dicho razonamiento, la metodología de investigación seleccionada para realizar el presente trabajo está basada en el enfoque constructivo de investigación, el cual pretende resolver problemas gracias a la construcción de modelos organizacionales o procedimientos, siendo un método de investigación ampliamente usado en ciencias técnicas como por ejemplo la ingeniería y la gestión de las prácticas industriales y empresariales (Kasanen *et al.*, 1993).

## 2.2. Justificación del enfoque de investigación

El enfoque constructivo puede caracterizarse dividiendo el proceso de investigación en fases, cuyo orden puede, por supuesto, variar de un caso a otro (Lehtiranta *et al.*, 2015).

Las fases que marcan el **enfoque constructivo** son las siguientes:

1. Encontrar un problema práctico relevante que también tenga potencial de investigación.
2. Examinar el potencial de la investigación a largo plazo
3. Obtener una comprensión general e integral del tema.
4. Innovar, es decir, construir una o más ideas de solución aplicables al problema.
5. Implementar la solución y demostrar su viabilidad.
6. Examinar el alcance de aplicabilidad de la solución.
7. Vincular la base teórica a los resultados obtenidos y mostrar la contribución de la investigación al concepto de solución.

Tomando en consideración la afirmación realizada por parte de Kasanen *et al.* (1993), en la que vinculan el enfoque constructivo con las investigaciones de prácticas industriales y empresariales, la justificación del enfoque de investigación se realiza valorando las características de la investigación de la tesis con las **fases del enfoque constructivo de investigación**:

### 1. Problema práctico relevante.

En base a la normativa vigente en España, en las compras on-line, el cliente dispone de catorce días naturales para devolver el producto sin coste. A sabiendas que la política de devoluciones se ha convertido en un elemento diferenciador entre las distintas compañías, las devoluciones en las compras on-line son ahora más fáciles que nunca (gratuidad, amplios plazos, recogida a domicilio, ...). No obstante, un recurso al que tiene derecho el comprador, cuyas condiciones se suavizaron hace unos años para incrementar el consumo en internet, se convierte en abusos y en un problema para la compañía. Se estima que en el e-commerce el flujo de devoluciones se sitúa entre un 20% y 25%, llegando incluso a un 50% en campañas como navidad.

Además, la concienciación social sobre el medio ambiente, las normativas medioambientales y la escasez de materias primas, provocan que las compañías implanten procesos de recuperación de productos.

Resulta esencial para las compañías implicadas disponer de un procedimiento que les facilite la gestión de los productos devueltos o recuperados, tratando de clasificarlos en función de cada situación para poder ser tratados de la manera más eficiente posible.

## **2. Potencial de investigación a largo plazo**

La gestión de los flujos de retorno originados por diversos motivos y fomentado por las distintas formas de reutilización y aprovechamiento, ha recibido una especial atención desde principios del siglo XXI. Durante los últimos años, el auge del comercio electrónico está provocando un crecimiento exponencial de la LI.

Frente a la necesidad de reenfocar la logística de las empresas, incluyendo la LI, apoyada sobre la creciente preocupación pública sobre temas de sostenibilidad, las empresas generan estrategias sostenibles, tratando de buscar no solamente el beneficio económico, sino también la minimización del impacto ambiental y la mejora social.

## **3. Comprensión general e integral del tema**

Este nuevo flujo de material, opuesto al flujo logístico directo o tradicional, incluye no sólo el transporte del producto desde el usuario hasta al productor o distribuidor, sino también la clasificación y tratamiento de los productos recuperados y de sus diferentes componentes.

Detrás de una devolución, se encuentra, muchas veces, una oportunidad de recuperar o volver a cautivar a un cliente, por ello generalmente una de las acciones que el cliente espera de la empresa es una rápida solución y, sobre todo, ser transparentes en la comunicación.

Desde un punto de vista operativo, resulta esencial definir muy bien el proceso de gestión de LI, destinando los recursos necesarios para decidir sobre el tratamiento

a aplicar a cada producto devuelto o recuperado de la manera más eficiente posible.

#### **4. Innovar, es decir, construir una o más ideas de solución aplicables al problema.**

Los problemas cotidianos con los que se enfrentan las empresas requieren el desarrollo de soluciones innovadoras que se adecuen a las peculiaridades presentes del entorno real. Habitualmente, la DD se realiza de manera visual para cada producto, analizando el estado en el que se encuentra para determinar el mejor destino.

La presente investigación se centra en el desarrollo de un Marco de Referencia, que permite formalizar el PLI y determina el tratamiento más adecuado de los productos en un contexto de LI. La designación del tratamiento más adecuado se consigue desde una perspectiva sostenible, es decir, teniendo en cuenta los aspectos económicos, ambientales y sociales anhelados a cada posible alternativa.

Además, dicho Marco de Referencia posibilita al decisor a introducir sus preferencias y jerarquizar la importancia de cada uno de los tres pilares de la sostenibilidad.

Ante la elevada incertidumbre asociada a la gestión de la LI y la gran cantidad de aspectos que influyen sobre la decisión a tomar, dotar a los decisores de una herramienta de ayuda que les permita tener actualizados dichos valores y sea adaptable a todas las situaciones inciertas, se convierte en una clara innovación aplicable al problema.

#### **5. Implementar la solución y demostrar su viabilidad.**

Resulta fundamental implementar los resultados teóricos de la investigación a los problemas del mundo real para demostrar su utilidad.

Dicha implementación que pretende mejorar la gestión práctica de la LI lleva asociada una información objetiva e independiente de retorno, por parte de la empresa hacia los académicos, sobre las características, los resultados y las limitaciones del Marco de Referencia diseñado. La retroalimentación resultará de

vital importancia para el perfeccionamiento de la investigación, permitiendo conseguir resultados más fiables y adecuados.

El Marco de Referencia genérico es adaptado a cada caso particular y ha sido testado en dos empresas reales que presentan sistemas de LI radicalmente diferentes. Por un lado, se ha aplicado en una empresa de sillones de relax que recibe habitualmente productos devueltos y recuperados para introducirlos de nuevo en su CdS. Dicha compañía presenta una red de LI de lazo cerrado, siendo la misma compañía fabricante la que trata los productos de LI.

Por otro lado, el Marco de Referencia es adaptado a una empresa de tratamiento de neumáticos usados, centrada exclusivamente en recoger, categorizar y tratar productos que ya han consumido parte de su vida útil. Dicha compañía constituye claramente una red de LI de lazo abierto.

Durante la aplicación del Marco de Referencia se ha observado su eficiencia y adaptabilidad en ambos casos, aflorando ciertas dificultades con las que se ha ido encontrando. Además, desde las experiencias prácticas se han recopilado sugerencias de mejora para poder corregir las limitaciones y analizar la aportación de la investigación, siendo altamente gratificante la respuesta de las compañías ante la aplicación del Marco de Referencia.

## **6. Examinar el alcance de aplicabilidad de la solución.**

La aplicabilidad de la solución planteada viene determinada por la adaptación del Marco de Referencia a la realidad de cada caso y de cada momento.

El primer paso para demostrar la aplicabilidad del marco se centra en adaptar el modelo de proceso genérico al caso particular, adecuando las alternativas de disposición viables. El segundo paso se centra en concretar los parámetros de sostenibilidad aplicables a cada alternativa en cada caso concreto. De esta forma, se desprecian aquellos parámetros o alternativas que no se apliquen, de manera que se pueda obtener el modelo particular del PLI y el modelo matemático particular en el caso real.



El tercer paso, se centra en la obtención de los valores de cada uno de los parámetros que sean de aplicación. En este sentido, será de vital importancia la correcta obtención de las valoraciones económicas, así como la cuantificación de las horas de mano de obra generadas por cada alternativa.

Tanto el software de aplicación como el método de valoración del impacto ambiental condicionan los valores ambientales de referencia para el modelo, siendo útiles más que por el valor, por la facilidad de comparación de valores entre los distintos tratamientos. Del mismo modo, la herramienta matemática permite la obtención de valores ambientales por parte de otros métodos o programas de valoración de impacto ambiental, debido a que tan sólo precisa un valor correspondiente a cada tratamiento para poder compararlos.

El cuarto paso para la correcta aplicación del Marco de Referencia se centra en la actualización de los datos, ya que resulta de vital importancia mantener los datos actualizados en todo momento para que la aplicación de la solución sea lo más eficiente posible.

#### **7. Vincular la base teórica a los resultados obtenidos y mostrar la contribución de la investigación al concepto de solución.**

La presente investigación está basada en el conocimiento existente en la literatura sobre la DD de los productos de LI. El estudio de esta área es algo novedoso y no parece que existan muchos enfoques destinados al análisis y mejora de la DD. Asumiendo la importancia del modelado de procesos de negocio, para la formalización de los procesos, y el modelado matemático, para la ayuda en la toma de decisiones, se ha implementado un Marco de Referencia que combina ambos tipos de modelado dando una solución integrada y adaptable a cada contexto.

El trabajo realizado contribuye al ámbito académico aportando un estudio sobre las decisiones clave de la LI, destacando la importancia de la DD. Además, aporta un modelo matemático de programación lineal entera con una triple función objetivo que ofrece una solución que maximiza la rentabilidad económica y el impacto social y minimiza el impacto ambiental. De la misma manera, muestra un proceso de solución que determina el tratamiento posible que más se aproxima a

una hipotética solución ideal, en base a las preferencias de cada decisor, englobado todo en un Marco de Referencia.

Desde un punto de vista práctico, el Marco de Referencia que se ofrece al mundo empresarial aporta agilidad y flexibilidad en la formalización de los PLI y en la toma de decisiones, sin descuidar el aprovechamiento máximo del valor de los productos y/o componentes, desde un enfoque sostenible, tratando de resolver con la mayor eficiencia posible un problema tan cotidiano como la designación del tratamiento de cada producto devuelto o recuperado.

De este modo, el enfoque constructivo de investigación parece el más adecuado para al presente estudio.

### **2.3.Fases de la metodología de investigación**

Una vez expuesto el enfoque constructivo de investigación, a continuación, se muestra la adaptación de las fases de la metodología de investigación al presente estudio:

#### **I. Identificación del problema y formulación de objetivos (Capítulos 1 y 2)**

En esta fase se identifica el problema, justificando su interés, y se muestra la necesidad de aportación de soluciones al mismo. Esta primera fase culmina con la definición de objetivos, el alcance de la investigación, la estructura y la metodología de la tesis.

#### **II. Estado actual de investigaciones sobre las decisiones de LI y sobre la DD (Capítulos 3, 4 y 5)**

Esta segunda fase se basa en una revisión sobre el estado del arte del tema principal de la tesis, empezando por documentar la información referente a la Logística Inversa (definición, sectores representativos, tipos de CdS Inversa, causas generadoras de LI), pasando por identificación y descripción de las decisiones principales que se toman en el proceso de LI, para acabar centrando el estudio en la decisión sobre la disposición a aplicar (DD).

### **III. Descripción del problema y líneas de actuación (Capítulo 6)**

Se define la problemática a resolver y se agrupa en tres bloques de problemas, aportando una línea principal de actuación para afrontar un bloque y otra línea principal de actuación para afrontar los otros dos bloques. Posteriormente, se plantea una línea global de trabajo que engloba ambas líneas principales de actuación, basada en el desarrollo del Marco de Referencia.

### **IV. Propuesta y Desarrollo del Marco de Referencia (Capítulos 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13)**

En esta fase se explica detalladamente la estructura y funcionamiento de cada uno de los bloques que componen el MR. Se dedica un primer capítulo a introducir el MR propuesto, desatacando los cuatro Bloques que lo componen. Posteriormente, se dedica un capítulo a explicar el Bloque I, referente al modelo genérico del PLI, y tres capítulos para el Bloque II, correspondiente a la herramienta matemática genérica. De estos tres capítulos, en un capítulo se explica el modelo matemático, en otro se expone el proceso de solución y en el tercero se muestra la validación de ambos apartados mediante experimentación.

Una vez expuestos los dos primeros bloques, se dedica un capítulo para explicar el Bloque III, correspondiente al modelo genérico integrado y, finalmente, un capítulo para explicar la metodología de adaptación del modelo genérico al modelo particular y el Bloque IV referente a la adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado.

### **V. Aplicación del Marco de Referencia (Capítulos 14 y 15)**

La quinta fase se caracteriza por la aplicación del Marco de Referencia en dos ejemplos reales, con el objetivo de validar su funcionamiento práctico y obtener información sobre su aplicabilidad. Además de aportar una solución al problema real, se obtiene una información vital para mejorar el funcionamiento del marco de trabajo.

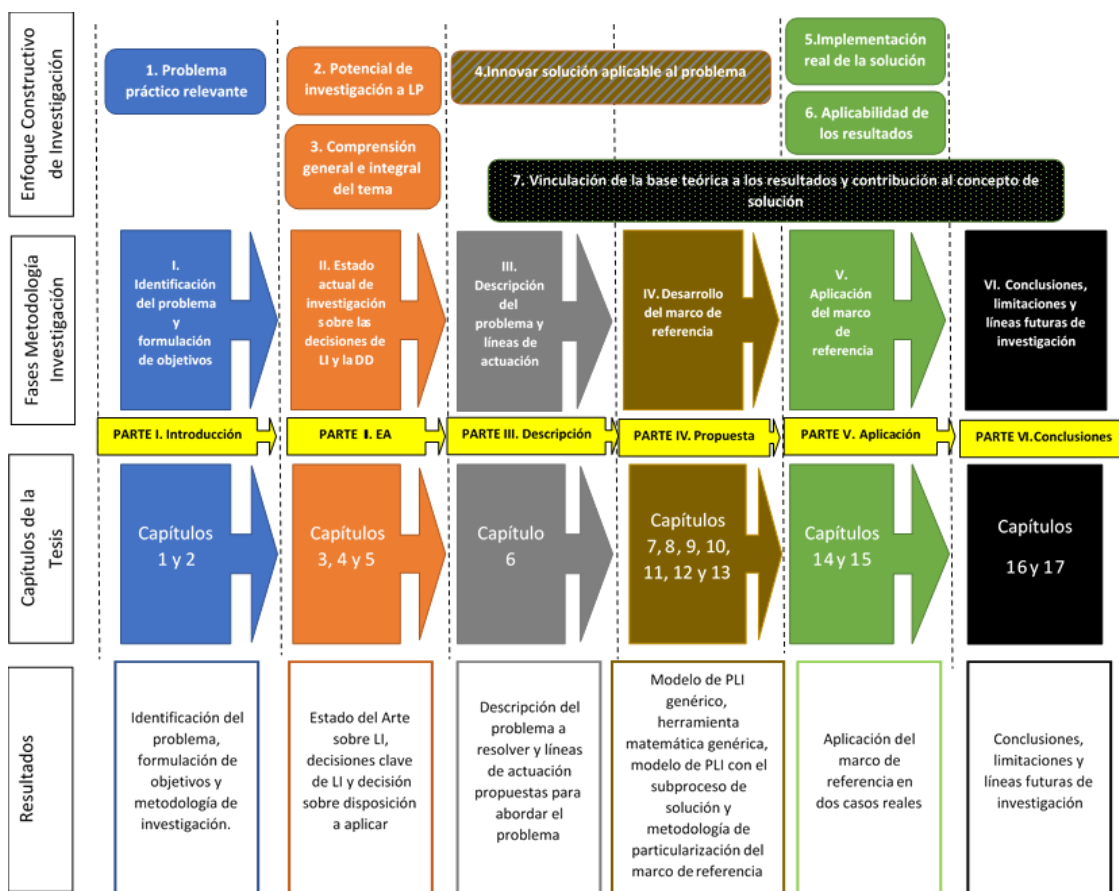
Se testea la utilidad del Marco de Referencia en dos casos reales, de manera que se adaptan los modelos genéricos del marco a cada caso particular. Se obtiene la

información directa de la compañía, se calculan los valores que se precisan para el funcionamiento del Marco de Referencia y se aporta la solución en cada caso, mostrando un análisis y una posterior reflexión sobre los resultados obtenidos.

**VI. Conclusiones, limitaciones y líneas futuras de investigación** (Capítulos 16 y 17)

La sexta y última fase del trabajo de investigación expone las conclusiones del estudio que tratan de resumir los resultados obtenidos, así como dar respuesta a los objetivos planteados en la primera fase. Además, se muestran las principales aportaciones conseguidas en el presente trabajo, tanto desde un punto de vista académico como profesional. Al mismo tiempo, también se exponen las limitaciones con las que cuenta el trabajo desarrollado, así como las líneas futuras de investigación abiertas a raíz de la elaboración del presente estudio.

El resumen de la metodología de investigación y las fases que la componen se muestra en la siguiente figura:



**Figura 3.** Metodología de investigación (Elaboración propia)

## 2.4. Referencias

- Kasanen, E., Lukka, K. and Siitonen, A. (1993). The constructive approach in management accounting research. *Journal of management accounting research*, 5, 243–264.
- Lehtiranta, L. *et al.* (2015). The Constructive Research Approach: Problem Solving for complex Projects. *Designs, Methods and Practices for Research of Project Management*, 95-106.
- Lukka, K. (2000). The key issues of applying the constructive approach to field research. *Reponen, T*, 113–128.
- Lukka, K. (2005). Approaches to case research in management accounting: the nature of empirical intervention and theory linkage. *Accounting in Scandinavia–The Northern Lights, Liber & Copenhagen Business School Press, Kristianstad, SW, 99*, p. 375-399.
- Neilimo, K. & Näsi, J. (1980). Nomoteettinen tutkimusote ja suomalainen yrityksen taloustiede. Tutkimus positivismiin soveltamisesta. *Tampere, Tampereen yliopisto*, 145.
- Rautiainen, A., Sippola, K. and Mättö, T. (2017) . Perspectives on relevance: The relevance test in the constructive research approach. *Management Accounting Research. Academic Press*, 34, 9–29. doi: 10.1016/j.mar.2016.07.001.

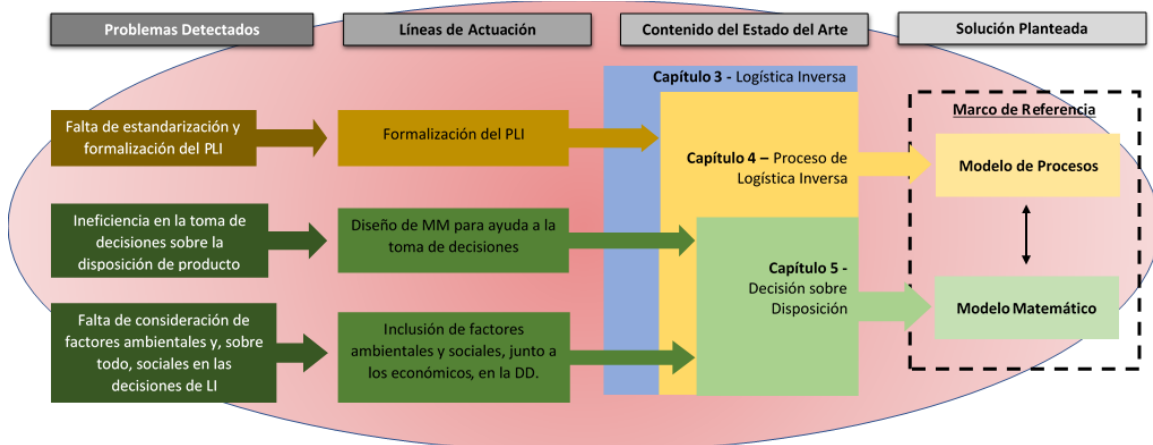
## **PARTE II. ESTADO DEL ARTE**

## Introducción al Estado del Arte

En la segunda parte de la tesis se pretende realizar una revisión de los trabajos más relevantes de la literatura para **desarrollar un Marco de Referencia que permita alcanzar los objetivos planteados**: formalizar el PLI, mejorar su eficiencia y considerar de la triple dimensión de la sostenibilidad en la toma de decisiones. El Marco de Referencia que se va a proponer pretende ofrecer, como principal aportación, una visión integrada de modelado de procesos con modelado matemático.

Tras una búsqueda bibliográfica sobre artículos relacionados con **marcos de referencia en el ámbito de la LI**, se destaca la revisión de literatura realizada por Govindan *et al.* (2014), donde se mencionan **algunos ejemplos de marcos de trabajo** (Barker y Zabinsky, 2008; Setaputra y Mukhopadhyay, 2010; Wikner y Tang, 2008). Sin embargo, ninguno de los trabajos mencionados se focaliza en el desarrollo del PLI combinado con herramientas matemáticas para la toma de decisiones. Otro artículo interesante es el realizado por Lambert *et al.* (2011), donde se propone un Marco de Referencia de decisiones de LI basándose en el modelado de procesos y en las decisiones clave de la LI, aunque sin hacer referencia al modelado matemático.

Para desarrollar el Marco de Referencia planteado como solución, a partir de los problemas detectados, se han definido unas líneas de actuación que determinan los apartados que se necesitarán abordar en el estado del arte, según se muestra en la figura siguiente:



**Figura 4.** Relación entre los problemas detectados, líneas de actuación, contenido del Estado del Arte y solución planteada (Elaboración propia).

De esta forma, se ha creído conveniente organizar el contenido del Estado del Arte desde lo más general a lo más concreto, estructurándolo en los siguientes apartados:

- 1) Un primer apartado dedicado a la Logística Inversa, en el que se introduce el concepto mediante algunas definiciones, se identifican los sectores más representativos que utilizan la LI y se describen los principales tipos de CdS Inversa. Dicho apartado se aborda en el Capítulo 3.
- 2) Un segundo apartado, centrado en el estudio del PLI para conocer mejor su funcionamiento. Para ello, se plantea una visión general del PLI destacando los distintos eventos de inicio y todas las posibles alternativas de disposición. Además, con la idea de ayudar a estructurar y documentar el PLI, se analizan las principales decisiones en el ámbito de la LI. El contenido de este apartado se encuentra recogido en el Capítulo 4.
- 3) Un tercer apartado, basado en la DD como decisión más importante y compleja del PLI. En dicho apartado, se definen, se analizan y se muestran los aspectos a considerar a la hora de tomar esta decisión clave. Además, se razona la importancia del uso de las herramientas matemáticas en el contexto de la LI y la necesidad de valorar la decisión con respecto al triple objetivo de la sostenibilidad. Este apartado se encuentra recogido en el Capítulo 5.

## Referencias

- Barker, T. J., & Zabinsky, Z. B. (2008). Reverse logistics network design: A conceptual framework for decision making. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(4), 250–260. <https://doi.org/10.1080/19397030802591196>
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2014). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603-626.
- Lambert, S., Riopel, D., & Abdul-Kader, W. (2011). A reverse logistics decisions conceptual framework. *Computers and Industrial Engineering*, 61(3), 561–581. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.04.012>
- Setaputra, R., & Mukhopadhyay, S. K. (2010). A framework for research in reverse logistics. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 7(1), 19–55.



<https://doi.org/10.1504/IJLSM.2010.033889>

Wikner, J., & Tang, O. (2008). A structural framework for closed-loop supply chains. *International Journal of Logistics Management*, 19(3), 344–366.  
<https://doi.org/10.1108/09574090810919198>

## **Capítulo 3. Logística Inversa.**

### **3.1.Introducción**

El presente apartado del estado del arte pretende ofrecer una necesaria visión de la LI que sirva de marco general para el contenido que posteriormente se desarrollará en la tesis.

Para ello, en la sección 3.2 se presentan las principales definiciones asociadas a la Logística Inversa y se justifica la definición adoptada para la realización del trabajo.

Posteriormente, en la sección 3.3 se identifican los sectores con mayor presencia dentro del ámbito de la LI para entender en qué sectores podría tener mayor incidencia la investigación propuesta. Junto a esta información, en la sección 3.4, se muestran las tipologías más comunes de redes de LI, englobándolas entre redes de lazo abierto o de lazo cerrado. Finalmente, se ofrecen las principales conclusiones extraídas de este capítulo son ofrecidas en la sección 3.5.

### **3.2.Logística Inversa. Definición.**

El concepto de Logística Inversa (LI) empieza a estar presente en la literatura a partir de los años setenta, cuando términos como “*Reverse Channels*” o “*Reverse Flow*” empiezan a utilizarse, ligados mayoritariamente al reciclaje (Gultinan y Nwokoye, 1974; Ginter y Starling, 1978).

Fue a principios de la década de los noventa, cuando el Consejo de Gestión de Logística (*The Council of Logistics Management – CLM*) elaboró la primera definición formal del término de logística inversa: “*la logística del reciclaje, la eliminación de residuos y la gestión de materiales peligrosos*”. Hasta ese momento, el término estaba estrechamente ligado al reciclaje, al vertido y a la gestión de materiales peligrosos, pero a partir de entonces se amplía incluyendo *todo lo relacionado con las actividades logísticas de reducción en origen, reciclaje, sustitución, reutilización y desecho* (Stock, 1992).

Poco tiempo después, Pohlen y Farris (1992) definen la LI como “*el movimiento de bienes de un consumidor hacia un productor, en un canal de distribución*”.

Kopicki *et al.* (1993) definieron la LI de manera análoga a Stock (1992), aunque añadiendo una alusión al sentido inverso del flujo de materiales, introducida previamente por Pohlen y Farris (1992), de la siguiente forma: “*La Logística Inversa es un término amplio que hace referencia a la gestión de la logística y a eliminación de residuos de*

*envases, peligrosos o no, y productos. Asimismo, incluye la distribución inversa que hace que los bienes y la información fluya en dirección opuesta a las actividades logísticas tradicionales”.*

Posteriormente, Rogers y Tibben-Lembke (1999) definen la LI como *“el movimiento de productos o materiales en la dirección opuesta, con el fin de crear o recuperar valor, o para su correcta eliminación”.*

Como se ha podido apreciar, estas definiciones de LI ponen el foco de atención en distintos aspectos: Stock (1992) y Kopicki *et al.* (1993) le dan más importancia a la eliminación de residuos y sitúan a la LI en un ámbito sobretodo ambiental. En cambio, Pohlen y Farris (1992) inciden más en el sentido del flujo, contrario al habitual, como elemento diferenciador. Finalmente, Rogers y Tibben-Lembke (1999) introducen las alternativas de la LI en base a la creación de valor o a la correcta eliminación de los productos.

El Grupo Europeo de Logística Inversa (*The European Working Group on Reverse Logistics, RevLog, 1998*) acuñó el término de LI basándose en las definiciones anteriores, añadiendo los distintos tratamientos posibles y no solo centrandolo en el origen en el cliente. De esta forma, dicho grupo propone una definición mucho más amplia, como se puede apreciar a continuación:

***“Se entiende como Logística Inversa, el proceso de gestión del flujo de materias primas, inventario en proceso y productos terminados, desde un punto de fabricación, distribución o uso a un punto de recuperación o de eliminación adecuada”.***

En esta definición se destacan tres puntos clave de la LI:

- El control de **flujo inverso**, en una dirección opuesta a la tradicional, no solo se realiza sobre productos terminados, sino que también hace referencia a materias primas e inventario en proceso.
- Contempla las entregas de producto **desde cualquier eslabón de la CdS a otro**, no sólo desde el cliente al productor como en la mayoría de los casos.
- Incluye los conceptos de **recuperación y eliminación**, como finalidad de las diferentes alternativas posibles de tratamiento.

Debido a que en esta definición se habla de flujo inverso de todo tipo de productos, se contempla el movimiento inverso entre cualquier eslabón de la CdS, y se incluye una amplia variedad de alternativas, es considerada como la definición más completa e interesante de las revisadas. Por ello, será esta definición la que se tome como base para la presente tesis.

### **3.3.Sectores que más utilizan la LI.**

En este apartado se identifican los sectores que más utilizan la LI con la intención de entender mejor el funcionamiento de la LI y saber en qué productos se aplica o es más necesaria. Esto a su vez, también permitirá conocer en qué sectores pueden tener mejor acogida y aplicación las aportaciones de la presente tesis.

Inicialmente, se ha utilizado una cadena de búsqueda de artículos compuesta por la combinación de los términos “Logística Inversa” y “Sector”, y en inglés “Reverse Logistics” y “Sectorial”. Analizando el material publicado de los últimos 10 años en distintos buscadores científicos como *Scopus*, *Science Direct*, *IEEEExplore* y *Emerald*, no se ha obtenido ningún resultado que se considerara relevante para la tesis.

Por ello, los sectores industriales con mayor presencia en el ámbito de la LI se han identificado en artículos científicos filtrados con las palabras clave “Logística Inversa” y “Reverse Logistics” en los mismos buscadores y en el mismo periodo que la búsqueda anterior. Los 115 artículos obtenidos en dicha búsqueda han sido analizados para extraer aquellas actividades industriales a las que se hace mayor referencia en la literatura.

Lo primero que cabe destacar es que, del total de artículos analizados, el 63’48 % (73 artículos) no tratan sobre un sector industrial en concreto, sino que elaboran un estudio general dentro del campo de la LI. De esta forma, existe gran número de artículos genéricos que se centran en el diseño de modelos matemáticos para el diseño de redes de logística inversa o que se centran en las implicaciones empresariales y decisionales a nivel directivo sobre la LI, e incluso sobre modelos de selección de proveedores de terceros para la externalización de la logística inversa (3PL).

Con el objetivo de identificar los sectores industriales más característicos en el ámbito de la LI, primero se plantea un listado de sectores que servirá como base para asignar cada artículo analizado al sector correspondiente.

El listado de sectores de referencia en cuestión se extrae de la tabla de la Clasificación Nacional de Actividades Económicas (CNAE). En la Tabla 1, se muestran los sectores englobados en los diferentes grupos.

NOMBRE	TIPO DE ACTIVIDAD O SECTOR
<b>GRUPO A</b>	AGRICULTURA, GANADERÍA, SILVICULTURA Y PESCA
<b>GRUPO B</b>	INDUSTRIAL EXTRACTIVAS
<b>GRUPO C</b>	INDUSTRIA MANUFACTURERA
<b>GRUPO D</b>	SUMINISTRO DE ENERGÍA ELECTRICA, GAS, VAPOR Y AIRE A CONDICIONADO
<b>GRUPO E</b>	SUMINISTRO DE AGUA, ACTIVIDADES DE SANEAMIENTO, GESTIÓN DE RESIDUOS Y DESCONTAMINACIÓN
<b>GRUPO F</b>	CONSTRUCCIÓN
<b>GRUPO G</b>	COMERCIO AL POR MAYOR Y AL POR MENOR; REPARACIÓN DE VEHÍCULOS DE MOTOR Y MOTOCICLETAS
<b>GRUPO H</b>	TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO
<b>GRUPO I</b>	HOTELERÍA
<b>GRUPO J</b>	INFORMACIÓN Y COMUNICACIONES
<b>GRUPO K</b>	ACTIVIDADES FINANCIERAS Y DE SEGUROS
<b>GRUPO L</b>	ACTIVIDADES INMOBILIARIAS
<b>GRUPO M</b>	ACTIVIDADES PROFESIONALES, CIENTÍFICAS Y TÉCNICAS
<b>GRUPO N</b>	ACTIVIDADES ADMINISTRATIVAS Y SERVICIOS AUXILIARES
<b>GRUPO O</b>	ADMINISTRACIÓN PÚBLICA Y DEFENSA; SEGURIDAD SOCIAL OBLIGATORIA
<b>GRUPO P</b>	EDUCACIÓN
<b>GRUPO Q</b>	ACTIVIDADES SANITARIAS Y DE SERVICIOS SOCIALES
<b>GRUPO R</b>	ACTIVIDADES ARTÍSTICAS, RECREATIVAS Y DE ENTRETENIMIENTO
<b>GRUPO S</b>	OTROS SERVICIOS
<b>GRUPO T</b>	ACTIVIDADES DE LOS HOGARES COMO EMPLEADORES DE PERSONAL DOMÉSTICO
<b>GRUPO U</b>	ACTIVIDADES DE ORGANIZACIONES Y ORGANISMOS EXTRATERRITORIALES

**Tabla 1.** Relación de los sectores englobados en cada grupo de la CNAE (Elaboración propia).

De todos los grupos de actividades que plantea el listado de la CNAE, este trabajo se va a centrar solamente en los grupos C y E. Puesto que se va a identificar los sectores industriales que hacen referencia a la LI, se escoge el grupo C porque se basa en las actividades industriales de manufactura. Además, se va a seleccionar el grupo E porque

recoge actividades fundamentales relacionadas con la gestión de residuos, como claro ejemplo de uso de LI.

La relación de los sectores dentro del **grupo C (Industria Manufacturera)** y del **grupo E (Suministro de agua, actividades de saneamiento, gestión de residuos y descontaminación)**, se pueden apreciar a continuación:

001. C.- Industria manufacturera
002. 10.- Industria de la alimentación
040. 11.- Fabricación de bebidas
049. 12.- Industria del tabaco
052. 13.- Industria textil
067. 14.- Confección de prendas de vestir
079. 15.- Industria del cuero y del calzado
085. 16.- Industria de la madera y del corcho, excepto muebles; cestería y espartería
094. 17.- Industria del papel
104. 18.- Artes gráficas y reproducción de soportes grabados
112. 19.- Coquerías y refino de petróleo
117. 20.- Industria química
140. 21.- Fabricación de productos farmacéuticos
145. 22.- Fabricación de productos de caucho y plásticos
154. 23.- Fabricación de otros productos minerales no metálicos
187. 24.- Metalurgia; fabricación de productos de hierro, acero y ferroaleaciones
209. 25.- Fabricación de productos metálicos, excepto maquinaria y equipo
235. 26.- Fabricación de productos informáticos, electrónicos y ópticos
254. 27.- Fabricación de material y equipo eléctrico
271. 28.- Fabricación de maquinaria y equipo n.c.o.p.
298. 29.- Fabricación de vehículos de motor, remolques y semirremolques
306. 30.- Fabricación de otro material de transporte
320. 31.- Fabricación de muebles
326. 32.- Otras industrias manufactureras
342. 33.- Reparación e instalación de maquinaria y equipo
E.- Suministro de agua, actividades de saneamiento, gestión de residuos y descontaminación
36.- Captación, depuración y distribución de agua
37.- Recogida y tratamiento de aguas residuales
38.- Recogida, tratamiento y eliminación de residuos; valorización
39.- Actividades de descontaminación y otros servicios de gestión de residuos

**Tabla 2.** Relación de sectores englobados en los grupos C y E de la CNAE (Elaboración propia).

Una vez expuestos los diferentes sectores industriales recogidos en los grupos C y E, se identifica el sector en concreto sobre el que trata cada uno de los artículos analizados y se asigna cada trabajo al sector correspondiente. De esta manera, en la tabla que se incluye a continuación (Tabla 3), se puede apreciar el número de veces que aparece cada sector en la literatura revisada. Asimismo, se destacan en amarillo los cuatro sectores que se han mencionado en mayor número de artículos y, por tanto, los que se considera que tienen mayor relevancia para este trabajo:

	ARTÍCULOS	%
001. C.- Industria manufacturera		
002. 10.- Industria de la alimentación	1	2,38%
040. 11.- Fabricación de bebidas	1	2,38%
049. 12.- Industria del tabaco	0	0,00%
052. 13.- Industria textil	1	2,38%
067. 14.- Confección de prendas de vestir	1	2,38%
079. 15.- Industria del cuero y del calzado	0	0,00%
085. 16.- Industria de la madera y del corcho, excepto muebles; cestería y espartería	0	0,00%
094. 17.- Industria del papel	1	2,38%
104. 18.- Artes gráficas y reproducción de soportes grabados	0	0,00%
112. 19.- Coquerías y refino de petróleo	0	0,00%
117. 20.- Industria química	0	0,00%
140. 21.- Fabricación de productos farmacéuticos	0	0,00%
145. 22.- Fabricación de productos de caucho y plásticos	0	0,00%
154. 23.- Fabricación de otros productos minerales no metálicos	0	0,00%
187. 24.- Metalurgia; fabricación de productos de hierro, acero y ferroaleaciones	1	2,38%
209. 25.- Fabricación de productos metálicos, excepto maquinaria y equipo	0	0,00%
235. 26.- Fabricación de productos informáticos, electrónicos y ópticos	16	38,10%
254. 27.- Fabricación de material y equipo eléctrico	5	11,90%
271. 28.- Fabricación de maquinaria y equipo n.c.o.p.	0	0,00%
298. 29.- Fabricación de vehículos de motor, remolques y semirremolques	11	26,19%
306. 30.- Fabricación de otro material de transporte	0	0,00%
320. 31.- Fabricación de muebles	0	0,00%
326. 32.- Otras industrias manufactureras	0	0,00%
342. 33.- Reparación e instalación de maquinaria y equipo	0	0,00%
1. E.- Suministro de agua, actividades de saneamiento, gestión de residuos y descontaminación		
2. 36.- Captación, depuración y distribución de agua	0	0,00%



5. 37.- Recogida y tratamiento de aguas residuales	0	0,00%
8. 38.- Recogida, tratamiento y eliminación de residuos; valorización	4	9,52%
18. 39.- Actividades de descontaminación y otros servicios de gestión de residuos	0	0,00%

**Tabla 3.** Relación de veces que cada sector industrial aparece en la literatura analizada (Elaboración propia).

Los cuatro sectores destacados abarcan más del 85% de la literatura analizada sobre la LI, cosa que podría llevar a pensar que son los sectores con más aplicación de la LI o que más interés despiertan para los investigadores sobre LI.

El **sector de fabricación de productos informáticos y electrónicos** es de una importancia considerable en el ámbito de la LI porque trabaja con productos con un ciclo de vida relativamente corto para el cliente, pero que aún pueden ser reutilizados en un elevado porcentaje de los casos por lo que, generalmente, su vida útil da para poder ser reutilizado en varios casos. Además, los residuos generados son muy perjudiciales para el medio ambiente, forzando esto a que la legislación gubernamental obligue a las empresas a hacerse cargo de los productos usados. Al mismo tiempo, el coste de los componentes de los artículos y el valor residual que aún contienen en el momento de desensamblaje favorece también que la LI documentada cuente con gran presencia en el sector.

Algo parecido al caso anterior es lo que se puede encontrar en el **sector de los vehículos a motor**, pero con la peculiaridad de que dicho sector es mucho más tradicional y resulta muy extendida la comercialización de los productos usados y sus componentes.

La **fabricación de aparatos domésticos** engloba elementos como motores, pilas y acumuladores eléctricos, entre otros, que siendo residuos peligrosos son considerados como importantes de cara a la logística inversa, en base a su gestión fuera de uso y su potencial campo en piezas de recambio.

El último sector a enfatizar es el de **recogida, tratamiento y eliminación de residuos**, centrado, sobre todo, en los productos de caucho y plástico, por la importancia en el reciclaje de plásticos como práctica fundamental de respeto hacia el medio ambiente y para la reducción de residuos.

### 3.4. Tipos de Cadena de Suministro Inversa según el flujo del producto

Tradicionalmente, las CdS sin procesos de retorno y reciclaje, se han modelado como estructuras lineales, con un flujo de mercancías unidireccional que va desde proveedores a fabricantes, mayoristas, minoristas, y finalmente a los consumidores. En cambio, las CdS modernas, actualizadas por la inclusión de la LI, revierten los flujos logísticos tradicionales convirtiéndolos en bidireccionales, para incluir actividades como la reutilización, reparación, reciclaje y eliminación responsable de residuos (Trappey *et al.*, 2010), pasándose a denominar Cadena de Suministro Inversa (CdSI) o Red de Suministro inversa (RdSI).

Definiendo Red de Suministro como “el conjunto de recursos que, puede pertenecer a más de una Cadena de Suministro”, se entiende que las diferencias entre Red y Cadena se centran en el número de nodos que tienen en cada fase y las relaciones entre ellos. Para esta tesis, aun siendo conscientes de las diferencias entre ambos términos, se cree adecuado utilizarlos indistintamente porque los matices que presentan no son relevantes para el objeto de estudio.

En este sentido, para gestionar la CdSI o RdSI de manera eficiente, el diseño es un tema crítico. El problema de diseño consiste, generalmente, en determinar el número y ubicación de las instalaciones y el establecimiento de los flujos de materiales entre las instalaciones (Alumur *et al.*, 2012).

**La incertidumbre** que caracteriza a la LI respecto a que no se sabe cuánto se va a recoger (cantidad), en qué condiciones se encuentran los productos recogidos (calidad), en qué momento van a recogerse (tiempo) y dónde deben recogerse (lugar), hace que su incorporación en la planificación de la producción convencional sea bastante compleja. Yang *et al.* (2008) defienden la idea de que las principales preocupaciones de la CdSI se basan en la sincronización y la coordinación de la LI, los flujos de información y los flujos de materiales con las entidades del sistema.

Habitualmente, una CdSI puede ser clasificada, bien como un sistema de **lazo cerrado**, o bien como un sistema de **lazo abierto**, según cómo se organice el flujo de materiales y de información entre las diferentes entidades.

En una CdSI de lazo cerrado, productos o materiales a menudo son devueltos a los productores originales, de manera que coexisten el flujo directo tradicional hacia el cliente y el flujo inverso de productos de vuelta a los fabricantes (Souza, 2013). Sin embargo, en una CdSI de lazo abierto, los productos no se devuelven a los productores originales, siendo recuperados por empresas externas (Gou *et al.*, 2008) que se dedican en exclusiva a tratar productos recuperados.

A continuación, en la Figura 5, se puede apreciar la combinación de la CdS “hacia delante” y CdSI formando un sistema de lazo cerrado. Dicho sistema, facilita la gestión eficaz de todo el ciclo de vida del producto en la fabricación verde (Xu *et al.*, 2011), entendida como el nuevo paradigma de fabricación más ecológica y ecoeficiente hacia el que están evolucionando los sistemas de fabricación (Deif, 2011).

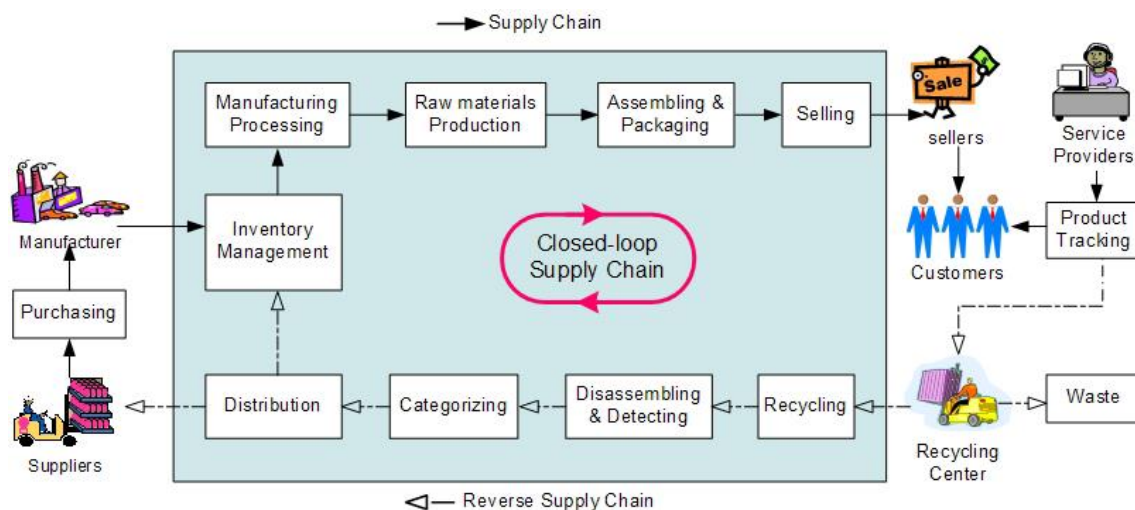
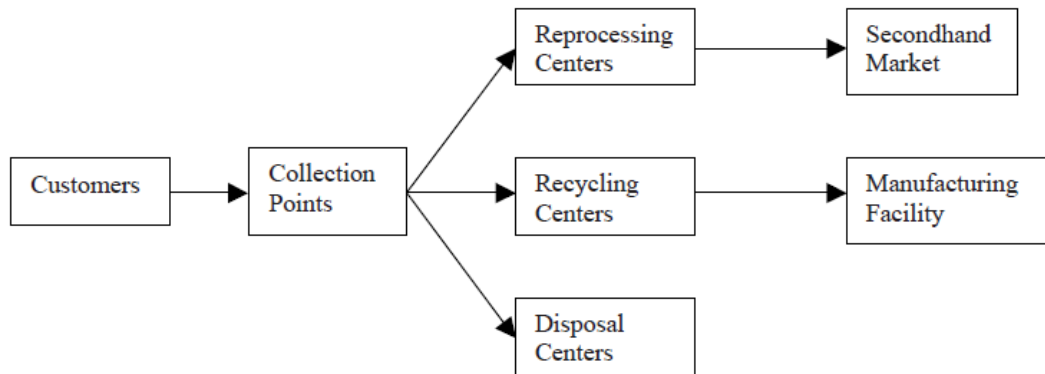


Figura 5. Estructura de la CdSI de Lazo Cerrado (Xu *et al.*, 2011)

La logística inversa y los problemas de la CdS de lazo cerrado han atraído la atención tanto del mundo académico como de los profesionales en un gran número de publicaciones en revistas científicas que se han publicado en los últimos años (Govindan & Soleimani, 2017; Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015).

Un claro ejemplo de sector que suele utilizar CdS de lazo cerrado son los electrodomésticos, ya que generalmente las empresas productoras/distribuidoras son las encargadas de la recolección y designación de tratamientos posteriores para los artículos.

En cambio, la estructura propuesta por Ene *et al.* (2014), y que se puede apreciar en la Figura 6, muestra una CdSI de lazo abierto, diseñada para la recogida de los productos usados de los clientes y su transporte a los centros de reciclaje y destrucción. Una vez en el centro de recogida, los productos son inspeccionados y se clasifican en tres posibles grupos en función de sus niveles de calidad: reutilizables, recuperables y no recuperables.



**Figura 6.** Estructura de la CdSI de Lazo Abierto (Ene *et al.*, 2014)

Los productos reutilizables serán transportados al centro de reprocesamiento, los productos recuperables serán trasladados a un centro de reciclaje y los productos no recuperables serán conducidos al centro de evacuación. Los productos reutilizables preparados serán llevados al mercado de segunda mano para la venta y los productos reciclados serán depositados en las instalaciones de fabricación como nueva materia prima.

Un claro ejemplo de este tipo de estructuras de CdS son las del sector de recogida, tratamiento y eliminación de residuos, ya que generalmente los productos son recogidos por empresas especializadas e independientes de los productores o fabricantes.

### 3.5. Conclusiones

El capítulo 3 presenta el concepto de Logística Inversa como eje principal sobre el que se construye la Tesis Doctoral. En este sentido, se han mostrado algunas de las principales definiciones del término de LI y las diferencias de una CdSI respecto a una CdS tradicional o hacia delante.

Se ha escogido la definición aportada por el Grupo Europeo de Logística Inversa como la definición de referencia para la presente tesis porque se refiere, no solo a productos acabados, sino también a materias primas y productos semielaborados. Además, contempla todas las entregas de producto entre cualquier eslabón de la CdS y hace referencia a la recuperación, a parte de la eliminación, como objetivo de las posibles alternativas, siendo así la definición más completa de todas las analizadas.

A través de su definición, se observa que la LI abarca un amplio campo de actuación con muchas alternativas y variedades, por lo que, para entender mejor el ámbito de trabajo más habitual de la gestión de la LI y, de paso, conocer los sectores que podrían tener mayor interés para la presente tesis, se ha realizado una revisión bibliográfica en la que se identifican aquellos sectores en el campo de la LI más trabajados en la literatura. El análisis de la literatura consultada muestra que más del 85% de los trabajos hace referencia a uno de los siguientes cuatro sectores: la fabricación de productos informáticos, electrónicos y ópticos; la fabricación de vehículos de motor, remolques y semirremolques; la fabricación de material y equipo eléctrico – electrodomésticos y el sector de la recogida, tratamiento y eliminación de residuos de caucho y plásticos.

Por último, profundizando sobre el concepto de LI, se han descrito las distintas tipologías de CdSI existentes; por un lado, las de **lazo cerrado**, como aquellas en las que los productos vuelven a sus productores/distribuidores originales y, por otro, las **de lazo abierto**, como aquellas en las que los productos son recogidos por agentes especializados.

Una vez introducido y analizado el concepto de LI, el resto de los capítulos de la parte III correspondiente al estado del arte, se focalizarán en el PLI y en la DD.

### 3.6.Referencias

- De Brito, M. P., & Dekker, R. (2004). A Framework for Reverse Logistics. *Reverse Logistics* 3–27. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-24803-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24803-3_1)
- Deif, A. M. (2011). A system model for green manufacturing, *Journal of Cleaner Production*. Elsevier, 19(14), 1553–1559. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.05.022.
- Dr. Dale S. Rogers and Dr. Ronald S. Tibben-Lembke (1999). *Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices* (2). Pittsburgh , PA: Reverse Logistics Executive Council.

- Ginter, P. M. and Starling, J. M. (1978). Reverse Distribution Channels for Recycling. *California Management Review*, 20(3), 72–82. doi: 10.2307/41165284.
- Govindan, K., & Soleimani, H. (2017). A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a Journal of Cleaner Production focus. *Journal of Cleaner Production*, 142, 371–384. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.126>
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015a). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Guiltinan, J. and Nwokoye, N. (1974). Reverse channels for recycling: an analysis of alternatives and public policy implications. *American Marketing Association Proceedings, Spring and Fall*, 36, 341-346.
- Kopicki, R., Michael, J. and Legg, L. (1993). Reuse and Recycling — Reverse Logistics Opportunities, *Transportation Journal*, 195, 64–66. doi: 9789995593834.
- Pohlen, T. L. and Farris, M. T. (1992). Reverse Logistics in Plastics Recyclin. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 22(7), 35–47. doi: 10.1108/09600039210022051.
- Souza, G. C. (2013). Closed-Loop Supply Chains: A Critical Review, and Future Research. *Decision Sciences*, 44(1), 7–38. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2012.00394.x>
- Stock, J. R. (1992). Reverse logistics: White paper. *Council of Logistics Management*.
- Tibben-Lembke, R. S. and Rogers, D. S. (1995). Supply Chain Management: An International Journal Differences between forward and reverse logistics in a retail environment. *Supply Chain Management: An International Journal*, 7(2), 271–282. <http://dx.doi.org/10.1108/13598540210447719>.
- Tibben-Lembke, R. S. and Rogers, D. S. (2002). Differences between forward and reverse logistics in a retail environment. *Supply Chain Management: An International Journal*, 7(5), 271–282. doi: 10.1108/13598540210447719.
- Xu, X., Wu, X. and Guo, W. (2011). Applications of IoT to Reverse Supply Chain. *7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 1–4. doi: 10.1109/wicom.2011.6040568.

# **Capítulo 4. El Proceso de Logística Inversa**

## 4.1. Introducción

El nivel de formalización del PLI se ha convertido en un indicativo del control que tiene una empresa sobre sus operaciones de LI (Genchev *et al.*, 2011), por tanto, conociendo mejor las operaciones que componen el PLI, se posibilita la ejecución del proceso con las mayores garantías de éxito. Sin embargo, se detecta una falta de formalización debido a que, en muchas ocasiones, el PLI no está documentado ni modelado y los datos relativos al PLI no existen, o existen y no son actualizados (Huscroft *et al.*, 2013).

En el presente capítulo se va a dar una visión integral del PLI aportando información sobre las operaciones principales que lo componen y las decisiones clave del mismo. Para conseguir este objetivo, se van a revisar trabajos relacionados con el PLI incidiendo, sobre todo, en la identificación y descripción de sus operaciones y de las principales decisiones del PLI.

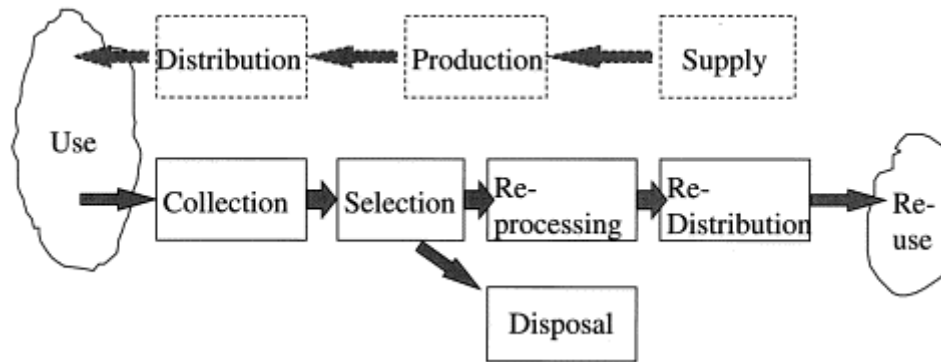
Para ello, en la sección 4.2, se describen las principales etapas que componen el PLI, ofreciendo información detallada sobre todos los posibles eventos que lo inician y todas las diferentes alternativas de tratamiento o disposición que ofrece. Posteriormente, en la sección 4.3, se trabaja sobre las decisiones clave del PLI. En primer lugar, son identificadas a través de una revisión de la literatura, infiriendo las decisiones desde las variables de decisión contenidas en los modelos matemáticos sobre LI. En segundo lugar, se describe detalladamente cada tipo de decisión identificada, exponiendo sus características a través de la explicación de los diferentes modelos que tratan cada una de ellas. En tercer lugar, se realiza una clasificación de las decisiones en base a clasificaciones genéricas de la literatura. El capítulo concluye en la sección 4.4, mediante la exposición de las principales conclusiones obtenidas.

## 4.2. Visión general del PLI

Los PLI han sido descritos y expuestos por muchos autores en diferentes perspectivas. Todas las configuraciones de PLI consultadas, consideran los **productos que pone el cliente a disposición de la empresa como entrada al proceso**, planteando diferentes **tipos de salida de los productos desde la empresa hacia su entorno**, bien en forma de producto final, o bien como componentes para su aprovechamiento o su eliminación controlada.



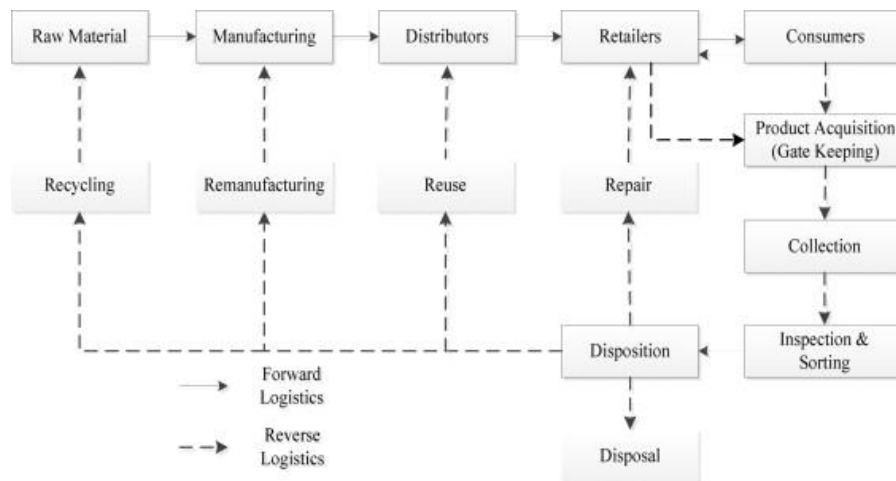
Si bien las etapas específicas en la conversión de entradas en salidas difieren según el caso, los autores destacan etapas generales recurrentes en los PLI. Unos de los autores más citados en cuanto a literatura referente a LI, Fleischmann *et al.* (2000), estructura el PLI para la recuperación de productos según como se puede apreciar en la Figura 7, junto con las actividades tradicionales de la CdS.



**Figura 7.** Cadena de recuperación de productos (Fleischmann *et al.*, 2000)

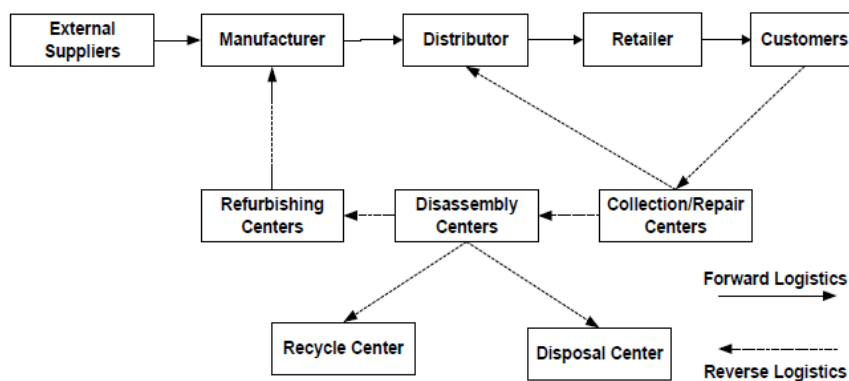
La recopilación (*Collection*) hace referencia a todas las actividades precisas para coger productos recuperados y moverlos físicamente a algún punto donde se pueda llevar a cabo la siguiente operación. La selección (*Selection*) denota todas las operaciones que determinan si un producto es designado para reutilizar y de qué manera. A partir de este punto, existe una separación de flujo distinguiendo entre las operaciones de reprocesamiento y las de desecho. El reprocesamiento (*Re-processing*) significa la transformación real de un producto usado en un producto utilizable nuevamente. La eliminación (*Disposal*) hace referencia al camino que adoptan aquellos productos que no pueden ser reutilizados por razones técnicas o económicas. Y la redistribución (*Re-distribution*) se refiere a dirigir los productos reutilizables a un mercado potencial y trasladarlos físicamente a futuros usuarios.

Las diferentes perspectivas sobre el PLI llevan a Agrawal *et al.* (2015) a realizar una revisión de literatura sobre dicho proceso. En este trabajo, se identifican, como etapas clave del PLI: la adquisición (*Product Acquisition*), la recogida (*Collection*), la inspección/clasificación (*Inspection & Sorting*) y la disposición del producto (*Disposition*), tal y como se muestran en la Figura 8.



**Figura 8.** Flujo básico de LD y LI (Agrawal *et al.*, 2015)

Otro estudio interesante que revisa la literatura sobre las actividades clave del PLI es el llevado a cabo por Sangwan (2017), (Figura 9). En él, se identifican tres etapas clave en toda RdSI: la recogida (*Collection*), la inspección/clasificación (*Inspection & Sorting*) y la recuperación de productos (*Product Recovery*).



**Figura 9.** Marco de trabajo generalizado para la CdS de Lazo Cerrado (Sangwan, 2017)

Independientemente del tipo de PLI, bien sea de lazo abierto o bien de lazo cerrado, se deduce que existen claramente tres grandes etapas comunes a todos ellos y que son determinantes para el correcto funcionamiento del proceso:

1. Una primera etapa, en la que se lleva el producto desde el cliente hasta la empresa, denominada recogida y transporte del producto. Independientemente de cómo se inicie el proceso, cabe tener en cuenta que el cliente es el que inicia/genera el proceso y la empresa es la que acaba tratando el producto, por tanto, esta primera etapa sería la que conecta el cliente con la empresa.

2. Una segunda etapa, en la que la empresa recibe el producto y realiza una inspección y valoración del mismo. Esta etapa, resulta fundamental para el PLI porque, a través de la decisión sobre la disposición del producto, se determinará qué hacer con cada uno de los productos (reutilización, intervención sobre el producto para reintroducirlo en el mercado, aprovechamiento de componentes o eliminación controlada).
3. Una tercera y última etapa clave es la que trata sobre la disposición del producto. En esta etapa, la empresa da salida a los productos hacia su entorno, mediante las diferentes alternativas de disposición.

Estas tres etapas generales y comunes de todo PLI se reflejan en la siguiente figura:



**Figura 10.** Etapas generales del PLI (Elaboración Propia)

Para completar la visión general del proceso, será importante también reflejar los eventos de inicio y fin. Los eventos de inicio que activarán el proceso son las distintas causas que provocan que el producto vaya de las manos del cliente a las empresas para ser tratados (expuestos en el apartado 4.2.1 del presente capítulo).

Además, con la idea de aportar una visión más exhaustiva del proceso, se van a explicar las distintas alternativas de disposición que la empresa podría elegir para darles salida a los productos (expuestos en el apartado 4.2.2 del presente capítulo).

Con ello, el proceso quedaría tal y como se representa en la figura siguiente:

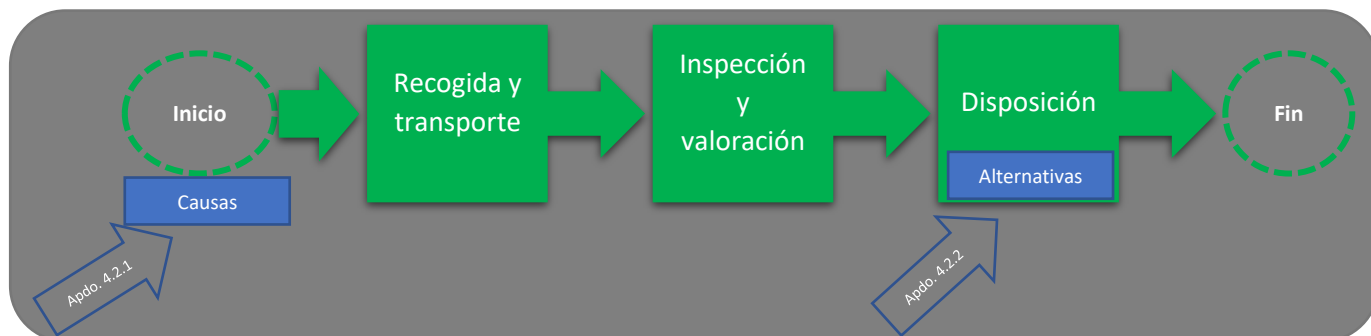


Figura 11. Visión general del proceso de LI (Elaboración Propia)

#### 4.2.1. Eventos de inicio del PLI

Los procesos de gestión de LI son iniciados a partir de la acción del cliente, quién entrega los productos para que sean reintroducidos en la CdS. Dicha acción, se realiza en dos contextos bien diferentes.

Por un lado, se encuentran aquellos productos que, tras su adquisición y prácticamente sin uso, son devueltos a su proveedor o fabricante por parte de los clientes porque estos determinan que no satisfacen sus necesidades. Es el caso, por ejemplo, de la compra de prendas de ropa que, inicialmente se adquieren y luego se devuelven porque son de un tallaje inapropiado.

Por otro lado, se hallan aquellos productos que el cliente decide no seguir utilizando. Sería el caso, por ejemplo, de la retirada de un teléfono móvil debido a su sustitución por otro modelo más reciente.

En ambos casos, se genera un flujo de productos desde el usuario al vendedor, fabricante o proveedor, para darle la mejor salida posible al producto y/o sus componentes (Ehrenthal y Stölzle, 2013).

De esta forma, se puede hablar de una logística de devoluciones (*return logistics*), en la que los consumidores han experimentado poco o ningún uso, y de una logística para la recuperación (*Logistics for recovery*), en la que los consumidores han usado el producto durante cierto tiempo, como dos realidades que coexisten en el concepto de LI (Rubio Lacoba, 2003).

A continuación, se describen con más detalle estos dos tipos de situaciones en las que se inicia el proceso de LI:

#### 4.2.1.1. *Devoluciones*

Se reconoce como devolución de producto, aquella entrega opcional y voluntaria que realiza un cliente hacia el vendedor o suministrador, sin apenas haber utilizado dicho artículo (Veritas, 2009). Las devoluciones de los productos se convierten, generalmente, en un problema para la CdS que hay que evitar a toda costa, ya que no aportan ningún valor, se pierde la venta y generan un coste añadido innecesario.

El objetivo prioritario de cualquier procedimiento de gestión de estas devoluciones pasa por evitar que se ocasionen. Pero, si a pesar de todos los esfuerzos, no se logran evitar, el objetivo siguiente pasa por buscar la máxima eficiencia, minimizando costes, a través de una gestión adecuada de los productos devueltos (Fernández *et al.*, 2004).

Las diferentes tipologías de devoluciones existentes se pueden clasificar en tres categorías: **devolución por no encontrarse el producto en condiciones óptimas, devolución del producto por errores diversos y devolución por deseo expreso del cliente.**

A continuación, se describe con más detalle cada una de ellas:

- **Devolución por no encontrarse el producto en condiciones óptimas.**

Un tipo de devoluciones muy comunes son aquellas generadas debido a un producto defectuoso que no se ajusta a los acuerdos previos de calidad entre comprador y vendedor. Esta circunstancia puede deberse, bien a que la mercancía haya sufrido una producción defectuosa, bien a que la mercancía haya sido dañada (posiblemente por una incorrecta manipulación en la fase de distribución y entrega), o bien incluso a que haya finalizado la vida legal del producto (caducidad).

En estos casos, el cliente devuelve los productos sin aportar ningún ingreso al proveedor, puesto que, por causas ajenas a él, no puede disfrutar del producto esperado. Asimismo, en este tipo de devoluciones, los productos ya no se encuentran en perfecto estado, generan una mala imagen y son un verdadero problema para la empresa.

Cuando se dan este tipo de devoluciones, la empresa intenta compensar el daño al cliente de alguna forma y puede hacer ofertas o descuentos para tratar de recuperar su confianza.

- **Devolución del producto por errores diversos**

El segundo tipo de devoluciones se suele producir cuando aparecen errores diversos, en el proceso de preparación y entrega. En este apartado se pueden recoger errores en la preparación del pedido (mercancía mal empaquetada o composición del pedido diferente a la solicitada), con documentación incorrecta o entregada fuera del plazo acordado.

A diferencia del caso anterior, los productos se encuentran en perfectas condiciones por lo que, la prioridad para la empresa será tratar de volver a ponerlos en el mercado cuanto antes. Además, en estos casos, el problema suele centrarse en determinar quién es el culpable de los errores producidos para hacer frente a los costes derivados de la devolución y, si procede, establecer los mecanismos de mejora adecuados para que dichos errores no se vuelvan a producir.

- **Devolución por deseo expreso del cliente.**

Este último tipo de devoluciones recoge todos aquellos casos en los que, aun no habiendo ningún fallo ni problema con la producción, distribución y entrega, el cliente decide devolver el producto.

En base a la normativa vigente en España, cuando el producto se obtiene en una tienda física con atención presencial, el establecimiento no está obligado a cambiar el producto ni a devolver el dinero, excepto si lo anuncia y lo publicita claramente o en los casos en los que el artículo presente algún defecto (Real Decreto Legislativo 1/2007). A pesar de que la ley no les obliga, la mayoría de los comercios cambian el producto o devuelven el dinero, por ser una buena práctica para fidelizar clientes.

En cambio, al comprar un producto por internet, el cliente dispone, por el mismo Real Decreto, de catorce días naturales, como mínimo, para devolver el producto, a contar desde que recibe el pedido. En estos casos, no hace falta dar ninguna explicación, simplemente ejercer el derecho de desistimiento.

En base al cumplimiento de este derecho del comprador, la LI va teniendo cada vez más importancia en la gestión del comercio electrónico y las empresas adaptan sus políticas de devoluciones a sabiendas de que se trata de un factor esencial de fidelización de clientes (Marin, 2015). En el caso de Amazon, por ejemplo, se ofrecen treinta días naturales desde que el producto llega a su destino, para que pueda ser

devuelto, ampliando así el periodo obligatorio de catorce días comentados anteriormente.

#### **4.2.1.2. Recuperación de productos**

La LI también puede tener su origen en productos que el cliente entrega para su recuperación, bien por voluntad propia o bien por funcionamiento incorrecto. Son los denominados productos recuperados (El Saadany y Jaber, 2011).

En lo que respecta a los productos recuperados y a sus componentes, es habitual encontrar heterogeneidad respecto al estado en el que se encuentran, diferenciando claramente entre dos categorías de productos: aquellos que aún cuentan con vida útil y aquellos que ya no se pueden utilizar más (Mitra, 2007).

- **Recuperación de productos que no han llegado al final de su vida útil.**

Este tipo de recuperación de productos se genera cuando el cliente entrega el producto y este puede seguir funcionando, bien directamente o bien tras una intervención. En este sentido, la prioridad para la empresa será volver a poner en funcionamiento el producto, por tanto, habrá que distinguir aquellos objetos que volverán al cliente, tras una reparación, por ejemplo, de los que se vuelven a poner a la venta.

- **Recuperación de productos que han llegado al final de su vida útil.**

Esta situación se genera cuando los productos han llegado al final de su vida útil, principalmente debido a la obsolescencia o daño sustancial. En estos casos, el producto ya no puede ser utilizado como conjunto, sino que tan sólo se puede recuperar parte del valor aprovechando los componentes.

A lo largo de estos últimos años, la logística de recuperación de productos ha ido adquiriendo cada vez más importancia debido a la necesidad de establecer una serie de procedimientos para el aprovechamiento de los productos desechados por parte de los clientes (Veritas, 2009). Principalmente, dichos procedimientos están motivados por causas legales o económicas:

- **Causas Legales:**

La Unión Europea marca, en su VII Programa de Acción de la Comunidad Europea en Materia de Medio Ambiente, para el periodo 2013-2020, como uno de sus principales ejes, construir una estrategia destinada a convertir a la UE en una “**economía circular**”, basada en una sociedad del reciclado para reducir la producción de residuos y utilizarlos como recursos. Para ello, **se establece una jerarquía de tratamientos de LI en la que, en primer lugar, se prioriza la no generación de residuos mediante la prevención, seguido de la recuperación, reciclaje, valorización y aprovechamiento energético de los mismos y, por último, eliminación (Parlament, 2013).**

En base a la consecución de dicho objetivo, distintos países de la UE, y con ellos España, han desarrollado variada legislación al respecto sobre envases y residuos, aparatos eléctricos y electrónicos, vehículos o neumáticos (entre otros).

A continuación, se presentan las principales leyes medioambientales a nivel nacional que hacen referencia a estos aspectos:

- [Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados](#); donde se regula el control de los residuos e incorpora el principio de jerarquía en la producción y gestión de residuos: prevención, reutilización, reciclaje y otras formas de aprovechamiento.
- [Ley 11/1997, de 24 de abril, de envases y Residuos de Envases](#); donde se regula la gestión de los envases y sus residuos, estableciendo las obligaciones de fabricantes envasadores y comerciantes.
- [Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero de 2015, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos \(RAEE\)](#); donde se detalla un modelo de gestión correcto de los RAEE más eficiente.
- [Real Decreto 20/2017, de 20 de enero, sobre los vehículos al final de su vida útil](#); donde se fomenta la reutilización de vehículos y se especifica el tratamiento que se debe seguir con ellos en los centros autorizados.
- [Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso \(NFU\)](#); cuenta con objetivos fundamentales



como prevenir los NFU y establecer el régimen jurídico de su producción y gestión, así como fomentar, por este orden, su reducción, reutilización, reciclado y otras formas de valorización, para proteger el medio ambiente y avanzar en pro de una economía circular.

A parte de estas leyes, el gobierno español ha aprobado recientemente la Estrategia Española de Economía Circular (EEEC), con la que se pretende dar el paso definitivo hacia la economía circular, ligada a un anteproyecto de ley de residuos, más restrictivo sobre el uso de plásticos de un solo uso a partir de julio de 2021 (España, 2018).

- **Motivos Económicos:**

Las razones económicas que empujan a las empresas a recuperar los productos y a aprovechar los recursos, se centran en el valor que se puede extraer de dichos productos y/o sus componentes.

Fundamentalmente, las mejoras económicas conseguidas a través de la recuperación de productos se centran en la reducción de costes de fabricación, por sustituir materias primas por componentes recuperados más económicos; por ingresos por venta de los productos recuperados e incluso por evitar sanciones económicas relativas al incumplimiento de leyes (Hernández *et al.*, 2011). Todo ello, favorece la obtención una ventaja competitiva, al dar una imagen de empresa respetuosa con el medio ambiente.

Un claro ejemplo de productos recuperados se puede encontrar en los neumáticos, donde el estado del producto y sus componentes determinan si éste puede seguir teniendo uso como neumático o, en cambio, se puede triturar para separar los componentes y aprovecharlos para diferentes finalidades como combustible, asfalto o losetas de parques infantiles (Dhouib, 2014).

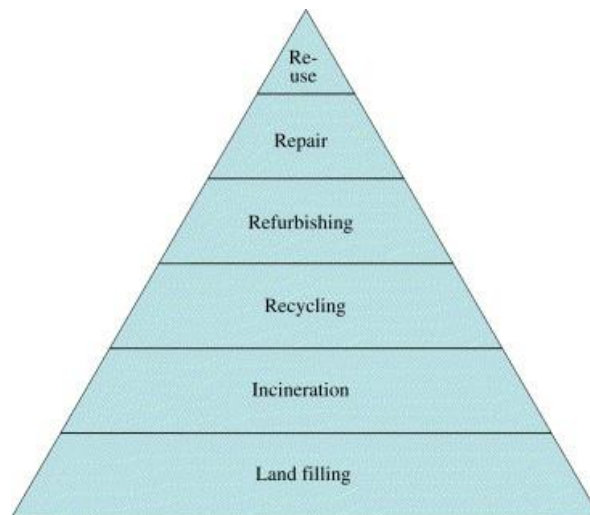
#### **4.2.2. Alternativas de disposición del producto recuperado o devuelto**

De la definición del concepto de LI se desprende que la LI (ver Sección 3.2), no sólo incluye el transporte del producto usado desde el cliente hasta el productor, o hasta el encargado de decidir el destino del producto, sino que engloba también todas aquellas operaciones que se pueden realizar sobre el producto para que vuelva a ser utilizado de

nuevo, o para que se aprovechen sus componentes de la forma más eficiente posible, buscando maximizar su valor (Dhib *et al.*, 2013; Torretta *et al.*, 2015).

En base a las principales leyes sobre el control de residuos y protección del Medio Ambiente, las diferentes alternativas de disposición sobre el producto recuperado o devuelto, son ordenadas jerárquicamente (Dhib *et al.*, 2013; Torretta *et al.*, 2015), como ya se introdujo en el Capítulo 3. Además, atendiendo a la similitud de términos entre decisión sobre disposición o decisión sobre tratamiento, se utilizará indistintamente la expresión alternativa de tratamiento y alternativa de disposición con el mismo significado.

En la figura siguiente (Figura 12) se puede apreciar la jerarquización de las alternativas de disposición de productos más común en la literatura.



**Figura 12.** Pirámide de opciones de disposición en la LI (Kumar y Malegeant, 2006)

De entre todas las posibles alternativas de disposición existentes en el campo de la LI, expuestas en la figura anterior, cabe diferenciar inicialmente entre las alternativas **con recuperación de valor** y aquellas **sin recuperación de valor**.

Las alternativas de disposición **con recuperación de valor**, basadas en la idea de aprovechar el valor residual que les queda a los productos y/o sus componentes, se subdivide en dos categorías claramente diferenciadas, según **si precisa de intervención sobre el producto o no**.

Inicialmente, la disposición prioritaria será recuperar el máximo valor del producto sin intervenir sobre él, tratando de reusarlo o reintroducirlo en el mercado lo más pronto

posible, tal y como se ha recuperado, de manera que pueda seguir usándose sin generar apenas coste para la empresa. En este ámbito, se engloba las opciones de reventa o reutilización, directa o a través de un mercado secundario tipo outlet. También se incluiría en este ámbito de alternativas la donación.

En el caso de que el producto no se pueda poner directamente de nuevo en el mercado, tal y como se ha recuperado, se tratará de **intervenir sobre él de manera que se pueda recuperar el máximo valor**. Las alternativas que contemplan una intervención sobre el producto con recuperación de valor contemplan dos finalidades claramente distintas: la reintroducción del producto en el mercado y el aprovechamiento de los componentes.

Prioritariamente, los tratamientos irán encaminados a volver a poner el producto a disposición del cliente, a través de su reparación, reacondicionamiento o remanufacturación. Cuando no sea posible volver a usar el producto, **se tratará de aprovechar al máximo el valor de sus componentes**, a través de la canibalización o del reciclaje.

Las disposiciones englobadas en el grupo de alternativas sin recuperación de valor pretenden la adecuada **eliminación**, bien de la totalidad del producto o de los componentes que no pueden tener ningún uso, por ejemplo, a través de la incineración o el vertido.

Las distintas alternativas de disposición mencionadas anteriormente son expuestas, de manera esquematizada, en la siguiente figura:

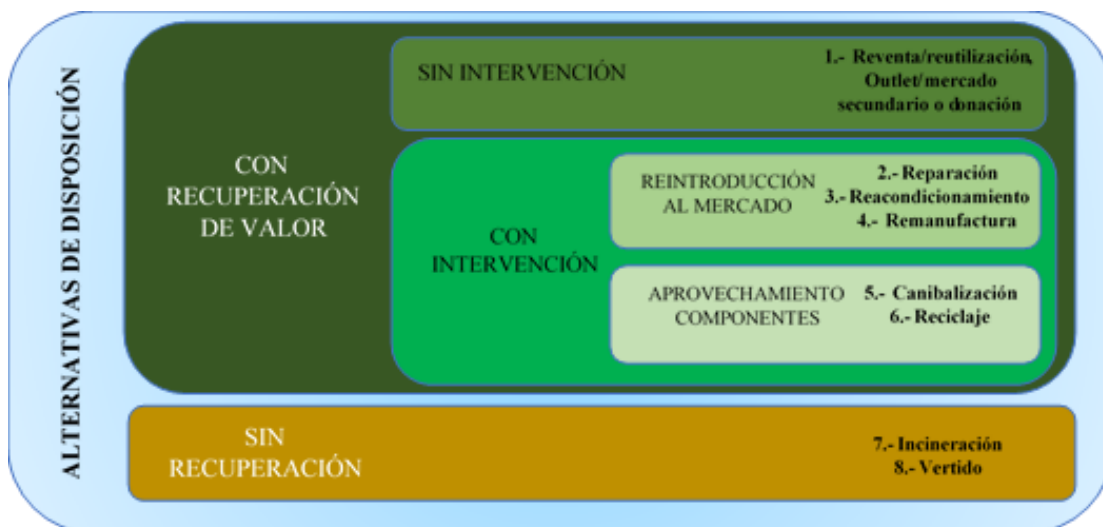
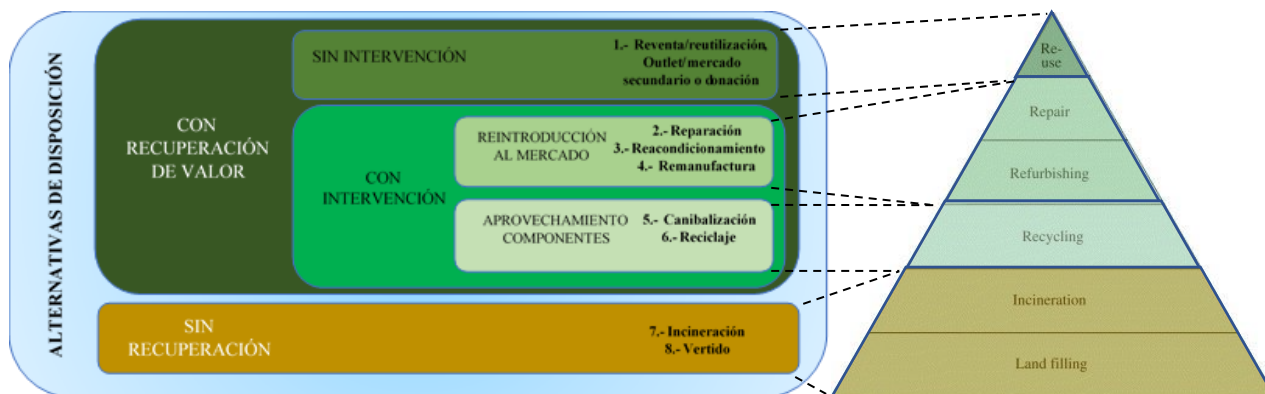


Figura 13. Clasificación de Alternativas de disposición de Logística Inversa (Elaboración propia)

Esta clasificación de las distintas alternativas de disposición se podría relacionar con la pirámide de opciones de disposición de la LI (Kumar y Malegeant, 2006), según la prioridad entre las alternativas, tal y como se muestra en la figura siguiente:



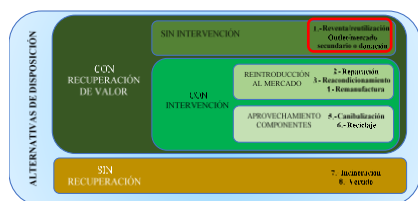
**Figura 14.** Relación entre la clasificación de Alternativas de disposición de Logística Inversa y la pirámide de disposición de LI (Elaboración propia)

A continuación, se describen las diferentes alternativas de LI con mayor detalle, ordenadas según la finalidad del tratamiento y la necesidad o no de intervención.

#### 4.2.2.1. Alternativas de disposición con recuperación de valor

##### 4.2.2.1.1. Sin intervención sobre el producto

- **Reventa / reutilización.** (*Direct Reuse / Resale*)



La disposición prioritaria que se da a los artículos de LI es ponerlos de nuevo en el mercado en el que estaban, sin intervención alguna, es decir, tratar de venderlos otra vez como si fueran nuevos.

Obviamente, para poder ponerse de nuevo a disposición del cliente, el producto debe mantener sus condiciones originales (casi) intactas. Generalmente, en este contexto no hace falta ninguna modificación ni cambio sobre el producto. Posiblemente, sólo algo de limpieza, re-embalaje y/o re-etiquetado.

Esta es la situación que se produce cuando, por ejemplo, los productos son devueltos por parte del cliente al punto de venta original (artículos textiles o complementos, aparatos electrónicos, informáticos, ...). Es en estos casos cuando la recuperación de valor es total.

Otra alternativa de disposición de los elementos de la LI sin intervenir sobre ellos, recuperando parcialmente el valor, puede ser la venta vía outlet o mercados secundarios, dónde se intenta dar salida a aquellos productos que no pueden ser vendidos por el canal de venta habitual, aceptando en contraprestación un importe inferior al que originalmente estaba previsto (Das y Chowdhury, 2012). Mayoritariamente, se trata de las tiendas y canales de venta que utilizan los mismos fabricantes o distribuidores para vender los excedentes de fabricación, las devoluciones que se han quedado desfasadas o artículos de inferior nivel, demostrando que pueden ser espacios rentables donde vender productos a un menor precio. En este sentido, la compañía mantiene el control de sus productos y trata de obtener cierta rentabilidad de aquellos ítems que no ha podido vender por su canal habitual.

Dicha categoría podría englobar también aquellas salidas que se les da a los productos que cumplen una función diferente para la que generalmente estaban diseñados o hacia un mercado menos exigente que el original. Un claro ejemplo de esta alternativa sería el tratamiento que se realiza a los alimentos que no se logran vender y que ya no son aptos para el consumo humano, pudiendo venderse y reaprovecharse para el consumo animal.

En el caso de que ninguna de las alternativas anteriores pueda llevarse a cabo, habría otra disposición a la que poder recurrir sin tener que intervenir sobre el producto: la donación.

En este caso, lo que se pretende es que se pueda seguir usando el producto antes de que este sea destruido, sin apenas recuperación de valor, siempre que el artículo siga siendo apto para el consumo humano y presente alguna característica que impida o dificulte su venta (algún defecto superficial o fecha de caducidad próxima, por ejemplo).

Dicha alternativa, aunque habitualmente no aporte ningún ingreso, se considera como una acción fundamental para sostener la responsabilidad social de las empresas, y conseguir que la parte de la sociedad más desfavorecida pueda alimentarse o vestirse, por ejemplo. Pese a su escasa o nula rentabilidad económica, cabe indicar que se puede obtener una cierta ventaja fiscal por la

donación. Por otra parte, también hay que considerar que algunas organizaciones de caridad están empezando a pagar por productos de primera necesidad recuperados.

#### 4.2.2.1.2. *Con intervención sobre el producto para recuperar valor*

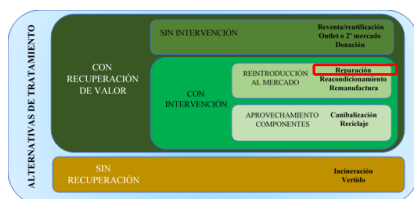
Cuando los productos no se encuentran en un estado suficientemente bueno para ser puestos de nuevo en el mercado, hay que plantearse si es necesaria alguna intervención para poder recuperar todo o parte de su valor inicial. En este sentido, se pueden estructurar las diferentes alternativas de disposición en función del objetivo de la intervención: por un lado, intervenir sobre el producto para recuperar valor con la intención de volver a sacarlo al mercado y, por otro, recuperar valor a través del aprovechamiento de partes o componentes del producto.

A continuación, se muestran las diferentes opciones de disposición, agrupadas en función de su finalidad:

##### 4.2.2.1.2.1. Reintroducción en el mercado

Las alternativas siguientes pretenden volver a poner en el mercado productos usados a través de cierta intervención, aunque difieran en el grado de mejora que confieren al producto. Así, la **reparación** implica el menor grado de mejora, y de esfuerzo, para actualizar el producto. Por el contrario, la **remanufacturación** garantiza la mayor intervención y, por consiguiente, el mayor grado de mejora, tal y como se explica a continuación:

- **Reparación (Repair)**

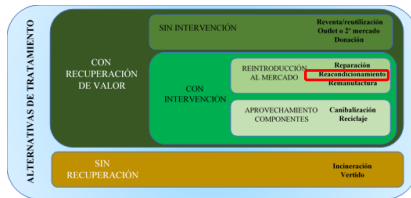


El propósito de este tratamiento es volver a poner el producto en funcionamiento, en la medida de lo posible, con las máximas garantías. Generalmente, una reparación implica cierto desensamblaje del producto y reparación o reemplazo de componentes que no funcionan correctamente.

Las reparaciones suelen llevarse a cabo en el domicilio del cliente o en centros de servicio técnico, principalmente, considerándose la calidad de los productos reparados ligeramente inferior a los productos originales.

Un ejemplo global y muy tradicional de este tratamiento es el de los electrodomésticos que, habiendo pasado el periodo de garantía, o no, precisan de cierta reparación para seguir funcionando.

- **Reacondicionamiento** (*Refurbishing*)

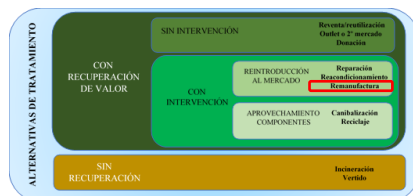


Reacondicionar un producto consiste en aportarle una calidad o funcionalidad específica que ha ido perdiendo debido al uso, o bien a que no existía en el momento de su creación. A través de la utilización de

tecnología específica, se reemplazan las partes dañadas o desfasadas para renovar las cualidades de los artículos, ampliando y mejorando el tiempo de vida útil del mismo.

Un buen ejemplo son los aparatos electrónicos e informáticos, ya que su tecnología avanza rápidamente y conviene un cierto “reacondicionamiento” o actualización para poder seguir usándose con las máximas prestaciones.

- **Remanufactura** (*Remanufacturing*)



El objetivo de este tratamiento es conseguir dotar al producto recuperado de la misma calidad original de los productos nuevos, gracias al reprocesamiento del artículo mediante sustitución o mejora de sus

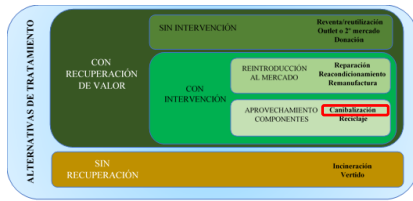
componentes. Este caso conlleva el desensamblado de las partes del producto, su clasificación, restauración y reensamblado, de manera que todos los componentes del producto son inspeccionados.

Casos típicos que se englobarían en esta alternativa son los ensamblados mecánicos de los motores de aviones o la remanufactura de las fotocopiadoras.

#### 4.2.2.1.2.2. Finalidad de aprovechamiento de partes o componentes

En aquellos casos en los que se desestima poder reparar el producto por completo para ponerlo de nuevo en funcionamiento, se plantean dos alternativas para poder recuperar el máximo valor a través del aprovechamiento de los componentes.

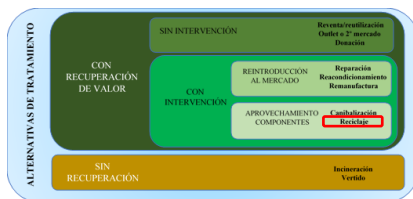
- **Canibalización** (*Cannibalization*)



En este caso, el propósito general es poder aprovechar los componentes del producto recuperado para ser reincorporados a otros productos. Generalmente en estos casos, se desestima poder reparar el producto por completo para ponerlo de nuevo en funcionamiento y conviene desensamblarlo para poder extraer aquellos componentes que aún puede prolongar por más tiempo su vida útil e incorporarlos a otros productos, generalmente ya usados también. Estas partes recuperadas, son reutilizadas en reparación, renovación o reprocesamiento de otros productos o componentes.

Un ejemplo típico de este caso son los vehículos, donde talleres, concesionarios y desguaces se convierten en el punto de recogida de estos productos que, generalmente, suelen tener más vida útil que la que último usuario le ha dado. Una de las principales características de este tipo de productos es que contienen un gran número de componentes, aunque no todos cuentan con la misma vida útil y no todos se encuentran en el mismo estado. Precisamente esta circunstancia conlleva que se requiera una clasificación adicional de componentes.

- **Reciclaje** (*Recycling*)



Mediante esta alternativa de tratamiento se pretende recuperar los materiales de fabricación del artículo para ser de nuevo utilizados como materia prima y generar nuevos productos, pudiendo alcanzar niveles de calidad tan altos como los productos originales.

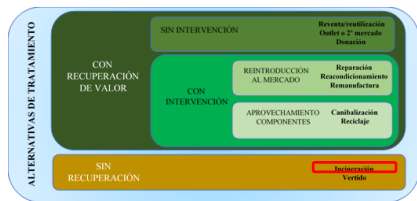
De esta forma, se reduce el volumen de desechos y la necesidad de utilizar más materias primas, lo que redundará en un ahorro de energía y de recursos naturales. Claro ejemplo de este tratamiento se encuentra en el papel, vidrio y plástico, elementos que suelen relacionarse, habitualmente, con el término de reciclaje.



**4.2.2.2. Alternativas de disposición sin recuperación de valor:**

Las últimas alternativas en el tratamiento de productos al final de su vida útil, intentando darles una salida lo más respetuosa posible con el medio ambiente, se basan en su destrucción controlada a través de la incineración o vertido. En algunos casos, este tratamiento permitirá la obtención de energía.

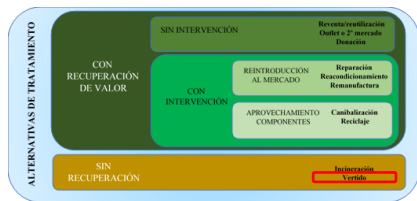
- **Incineración (Incineration)**



Durante la incineración, se genera una combustión controlada a altas temperaturas en la que se reducen enormemente los residuos en volumen y peso, convirtiéndose en materiales inertes (cenizas) y gases.

Este proceso de incineración permite la obtención de energía eléctrica. En países como Suecia, por ejemplo, el 96 % de los residuos son incinerados para obtener energía eléctrica y, a través de un programa estatal, se abastece a una gran cantidad de familias con dicha energía.

- **Vertido (Landfilling)**



Aunque inicialmente no está considerada como una opción válida de recuperación de valor, el vertido se considera como la última alternativa en la disposición de los productos al final de su vida útil. A través del

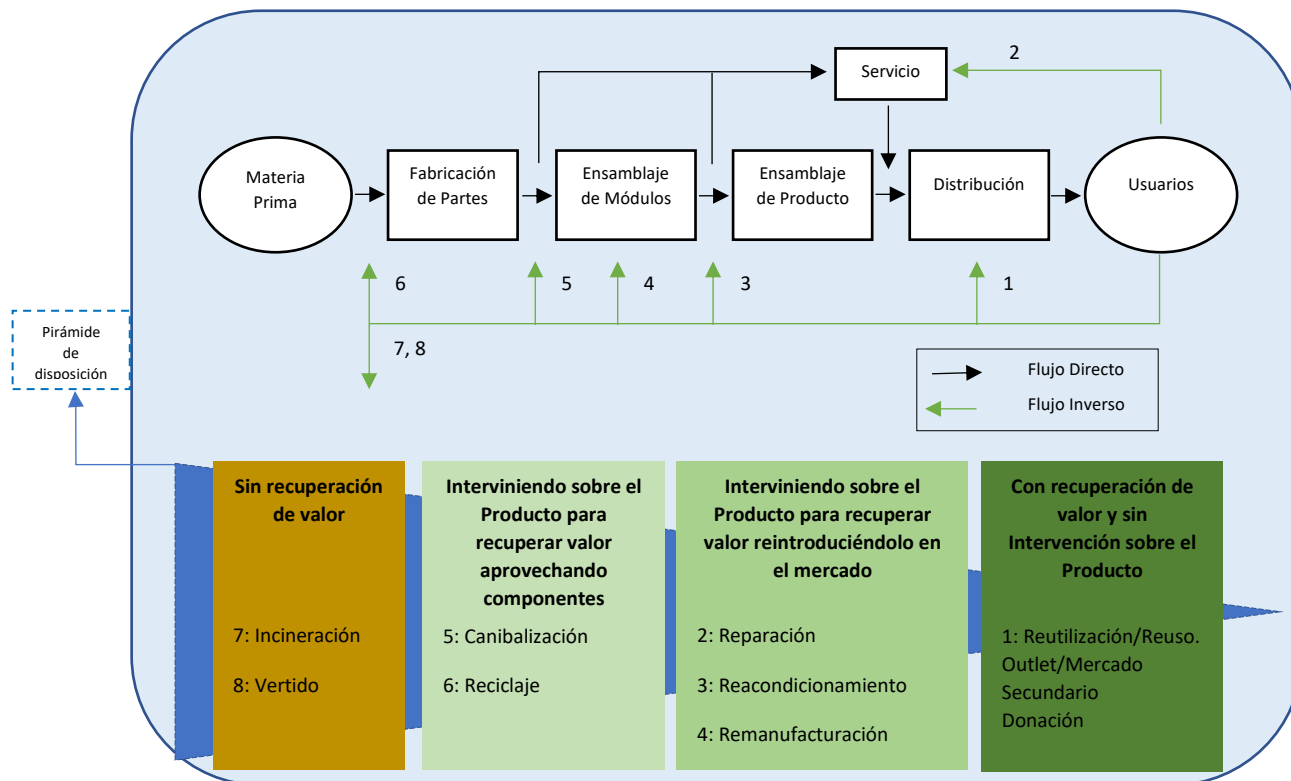
vertido, se da una salida lo más respetuosa con el medio ambiente posible, gracias a una eliminación controlada.

Un vertedero controlado consiste en la excavación de grandes extensiones de terreno que se van rellenando, intercalando capas de basura con capas de tierra.

La coexistencia de múltiples tipos de basura en los vertederos causa contaminación en el aire, agua y suelo, reduciendo así la calidad del medio ambiente en general y en particular de las zonas cercanas a los vertederos.

En el trabajo de Thierry *et al.* (1995), se muestra el flujo de producto que se corresponde con cada una de las alternativas de disposición mencionadas anteriormente, sobre un

modelo de CdS con cuatro etapas principales: fabricación de partes, ensamblaje de módulos, ensamblaje de producto y distribución. A continuación, se incluye una figura adaptada a partir de dicho trabajo en la que se ubican las alternativas de disposición comentadas:



**Figura 15.** Tipos de Disposición de Logística Inversa (Adaptado de Thierry *et al.*, 1995)

Las distintas opciones de disposición de productos de LI, además de permitir recuperar parte del valor económico del producto, representan una oportunidad de negocio para las empresas y generan beneficios ambientales para la sociedad debido a la reducción de vertidos finales.

Por ello, **la idea detrás de la gestión integrada de LI es que, en lugar de aceptar una simple jerarquía de alternativas, se puedan examinar las alternativas de manera sistemática para que los productos sean tratados desde el punto de vista de aportar el mayor valor posible de sostenibilidad** (Clift *et al.*, 2000).

En este apartado, se ha ofrecido una visión general del proceso en base a la revisión de la literatura, incidiendo sobre las causas que lo originan y sobre las distintas alternativas de disposición que tienen los decisores del PLI a su alcance. Sin embargo, en base al objetivo de formalizar el proceso y mejorar su eficiencia, resulta imprescindible estudiar las

decisiones que se toman a lo largo del PLI. A este respecto, cabe indicar que, la literatura consultada, no ha ofrecido detalle suficiente. Por lo tanto, para comprender íntegramente el PLI en toda su magnitud y detalle, se considera imprescindible una revisión de literatura más amplia que incida sobre las decisiones del PLI.

### **4.3.Decisiones clave del PLI**

En este apartado se pretenden identificar y describir detalladamente las principales decisiones que están relacionadas con el PLI. Para ello, se centrará la búsqueda en la literatura sobre las decisiones que se toman en el PLI.

#### **4.3.1. Identificación de las decisiones clave del PLI**

El diseño de un marco de trabajo de modelado sobre la LI siempre ha sido un desafío para los investigadores, especialmente cuando existen diferentes alternativas disponibles, con una cierta variabilidad en la evaluación de estas alternativas en función de distintos parámetros, agravado por una elevada incertidumbre, en cuanto a la recuperación de productos se refiere (Gu y Liu, 2013).

El objetivo de este apartado es profundizar en la importancia de las decisiones clave del PLI para conducir a una mejor gestión de dicho proceso, basada en una toma de decisiones lo más ágil y eficiente posible. Por lo tanto, el primer paso será descubrir cuáles son las principales decisiones en el PLI.

Para ello, se ha recurrido a la búsqueda de literatura utilizando las siguientes cadenas de: “*key decisions*”, “*decision variables*”, “*decision types*”, combinadas con términos referentes a LI como “*reverse logistics*”, “*reverse supply chain*” o “*Closed-loop supply chain*”.

En esta búsqueda no se han encontrado trabajos que aborden, en detalle, las decisiones clave de LI. Solo se han encontrado unos pocos documentos que mencionan decisiones y estos se centran en dos perspectivas diferentes:

- **Trabajos que analizan cómo diferentes aspectos influyen sobre la gestión de la LI**, como los de Zhang *et al.* (2008); Wei y Gu (2015); Guarnieri *et al.* (2016); Yunfeng y Zhonghua (2016) y Makarova *et al.* (2018). Esta influencia es analizada a nivel general del PLI, sin particularizar sobre las decisiones de dicho proceso.

- **Trabajos que mencionan las decisiones de LI**, por un lado, exponiendo las variables de decisión de LI más importantes (Red de LI, métodos de recogida y disposición) y mostrando sus indicadores de rendimiento, como el trabajo de Sangwan (2017). También estudios centrados en una decisión específica, tales como: Dhouib (2013) y Chinda y Ammarapala (2016) (**disposición** de productos), Krumwiede y Sheu (2002), Zhang y Feng (2007) y Agrawal *et al.* (2016) (**subcontratación de tareas** de LI a terceros), Cherkaoui *et al.* (2015) y Wei y Gu (2015) (**planificación de producción con objetos recuperados**) y Wang *et al.* (2018) y Yu y Solvang (2018) (**diseño de la red de LI**).

A pesar de que no se han encontrado referencias que encajen con la identificación, descripción y clasificación deseada, sí se constata que existe una extensa bibliografía sobre MM, debido a que el uso de herramientas matemáticas para diseñar sistemas de LI está adquiriendo una gran importancia en el campo de la investigación (Banguera *et al.*, 2018).

Los MM, han sido ampliamente reconocidos como una potente herramienta de ayuda a la toma de decisiones de la CdS. Además, tradicionalmente han contribuido a mejorar la gestión de las operaciones, bien de manera directa, incorporando los modelos en sistemas de software para automatizar y optimizar decisiones, bien de manera indirecta, contribuyendo a mejorar la comprensión de las interacciones entre diversos procesos (Dekker *et al.*, 2004). Por ello, los MM aplicados a la LI, incorporan variables de decisión que representan las principales decisiones que se toman en el proceso de LI.

En base a ello, se ha pensado que una manera de cubrir el hueco encontrado en la literatura respecto a la identificación de las decisiones en el PLI es estudiar los MM y sus variables de decisión para, a partir de ellos, identificar las principales decisiones que se toman en el PLI.

Por lo tanto, a continuación, **se revisan MM en un contexto de LI con la idea de inferir, a partir de ellos y de sus variables de decisión, las principales decisiones modeladas y utilizadas en el PLI.**

El primer paso para la búsqueda de estos trabajos es definir las palabras clave que servirán como criterios de búsqueda. Así, se han definido dos grupos principales de palabras clave:

- **Logística Inversa:** *Reverse logistics, Reverse Supply Chain, Product Recovery, Product Return & Closed-loop Supply Chain.*
- **Modelo Matemático:** *Mathematical Model, Math Programming Model, Mathematic Programming.*

En los últimos quince años, la literatura sobre la LI ha sido una tendencia creciente debido al interés de los investigadores hacia el medio ambiente y el desarrollo empresarial sobre los productos recuperados (Prajapati *et al.*, 2019). Por este motivo, se exploraron artículos científicos, publicados en ese periodo de tiempo, de acuerdo con los criterios de búsqueda establecidos en las siguientes bases de datos: *IEEEExplore, Science Direct, Emerald, Dialnet y Google Scholar.*

De todos los artículos obtenidos, se han descartado los trabajos repetidos y aquellos centrados en temas diferentes al interés de este estudio. Finalmente, han sido seleccionados 49 artículos, que se han analizado en profundidad, poniendo el foco en las variables de decisión.

Las decisiones modeladas y estudiadas en los artículos considerados relevantes se han agrupado inicialmente por semejanza en las siguientes **cinco categorías**, facilitando así su descripción y su tratamiento en los apartados siguientes:

1. **Estructura y capacidad de la red de LI.** Esta categoría incluye las decisiones sobre la configuración de la red de LI, las cuales se centran mayoritariamente, en decidir sobre la apertura y la capacidad de centros de tratamiento y fabricación de componentes, tanto en la red de LI formada por las instalaciones de la propia empresa, como en la formada con socios externos colaboradores, siendo estas denominadas como:
  - a. **Red de LI propia**
  - b. **Red de LI colaborativa**
2. **Políticas empresariales.** En este apartado se recogen las decisiones relativas a la política de precios a adoptar para cada caso de LI y las relativas a la política a seguir con respecto a las devoluciones que debe gestionar la empresa:
  - a. **Política de precios**
  - b. **Política de devoluciones**

3. **Planificación de la producción con productos recuperados.** En esta sección se agrupan las decisiones referentes, tanto a la planificación de la producción a realizar incorporando los productos que han sido recuperados, como las referentes a la composición de los productos finales.
4. **Rutas logísticas.** Aquí se incluyen todas las decisiones relacionadas con los recorridos por parte de los vehículos que trasladan los productos y/o componentes en el flujo inverso de la logística, así como las relacionadas con las cantidades a trasladar de un sitio a otro.
5. **Disposición del producto.** Este apartado recoge las decisiones que hacen referencia a la elección del tratamiento a aplicar a los productos que entran a la red de LI.

A continuación, se muestra una tabla (Tabla 4) en la que se indica la categoría de decisión abordada en cada uno de los trabajos revisados, con el objeto de poder identificar más fácilmente las decisiones que han sido tratadas en cada caso, así como el total de veces que cada una de ellas ha sido abordada:

PARTE II. ESTADO DEL ARTE.  
Capítulo 4. El Proceso de Logística Inversa.

Listado de trabajos ordenados por año de publicación	1.- Estructura y capacidad de la Red de LI		2.- Políticas empresariales		3.- Planificación de la producción de la producción con productos recuperados	4.- Rutas logísticas	5.- Disposición del producto
	a) Red de LI propia	b) Red de LI colaborativa	a) Política de precios	b) Política de devoluciones			
Jayaraman et al., (2003)	1					1	
Inderfurth, (2005)					1		1
Salema et al., (2006)	1				1		
Kim et al., (2006)					1		
Salema et al., (2007)	1						
Ko and Evans, (2007)	1				1		
Demirel and Gökçen, (2008)	1				1	1	
Pati and Kumar, (2008)		1			1	1	
Erbao et al., (2008)						1	
Gomes et al., (2008)							1
El-Sayed et al., (2010)	1						
Salema et al., (2010)	1				1		
Benedito and Corominas, (2010)					1		
Saadany and Jaber, (2010)							1
Jianghong, (2010)		1					
Qian et al., (2011)		1					
Harraz and Galal, (2011)	1				1		1
Ramkumar et al., (2011)					1		
Shi et al., (2011)					1		1
Saadany and Jaber, (2011)							1
Das and Chowdhury, (2012)	1				1		
XiaoYan et al., (2012)		1			1		
Piplani and Saraswat, (2012)	1					1	
Zeballos et al., (2012)	1				1	1	
Achillas et al., (2012)		1					
Özkır and Başlıgil, (2013)	1				1	1	
Kızılboğa et al., (2013)	1				1		
Jonrinaldi and Zhang, (2013)					1		
Dhib et al., (2013)							1
El Saadany et al., (2013)							1
Ashfari et al., (2014)	1						
Ene and Öztürk, (2014)	1					1	
Faccio et al., (2014)	1					1	
Niknejad and Petrovic, (2014)							1
Dhouib, (2014)							1
Darbari et al., (2015)	1				1		1
Rezapour et al., (2015)	1				1	1	
Yang et al., (2015)			1	1			
Han et al., (2016)			1		1		
Kuik et al., (2016)					1		
Desport et al., (2016)					1		
Rahimi et al., (2016)						1	
Soysal, (2016)						1	
Liu et al., (2017)		1	1				
Amin and Baki, (2017)	1				1	1	
Pedram et al., (2017)	1				1	1	
John et al., (2017)	1					1	
Gan et al., (2017)			1				
Panagiotidou et al., (2017)					1		
<b>Total</b>	<b>21</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>25</b>	<b>15</b>	<b>11</b>
<b>%</b>	<b>42,86%</b>	<b>12,24%</b>	<b>8,16%</b>	<b>2,04%</b>	<b>51,02%</b>	<b>30,61%</b>	<b>22,45%</b>

**Tabla 4.** Categorías de decisión abordadas en cada trabajo revisado (Elaboración propia).

Como se puede apreciar en la tabla anterior, un total de 25 trabajos de los 49 analizados (algo más del 51%) tratan, en sus modelos matemáticos de LI, sobre la *planificación de la producción con productos recuperados*.

Asimismo, un total de 21 trabajos revisados tratan el diseño de la *red de LI propia* y 6 trabajos, el diseño de la *red de LI colaborativa*, lo que supone que un total de 27 trabajos dedicados al diseño de la CdSI.

Un total de 15 artículos hacen referencia a la configuración de los itinerarios de los vehículos o *rutas logísticas* entre los eslabones de la CdS. Por otra parte, la *decisión basada en la disposición* de los productos sirve como eje de estudio en 11 trabajos analizados, correspondiendo al 22'45 % del total de artículos.

Las decisiones correspondientes a las *políticas empresariales* (precios y devoluciones) son las que menos se han tratado en los modelos consultados, siendo la decisión sobre devoluciones la categoría que menos ha aparecido; una sola vez (trabajo de Yang *et al.*, 2015).

#### **4.3.2. Descripción de las decisiones clave del PLI**

A continuación, se describen en detalle cada una de las decisiones clave del PLI identificadas en los modelos matemáticos de los trabajos revisados. La descripción de cada decisión se hará, básicamente, comentando y referenciando los trabajos analizados.

En este sentido cabe tener en cuenta que, como ya se ha comentado en el apartado anterior, aproximadamente la mitad (49%) de los modelos matemáticos consultados se centran en una sola de las decisiones clave identificadas mientras que, la otra mitad (el 51%) tratan dos o más decisiones. Esto implica que, como hay un apartado para cada decisión, los trabajos que tratan dos o más decisiones deberían aparecer en dos o más apartados, originando duplicidad de información y alargando innecesariamente la extensión del trabajo. Este aspecto se evita en el trabajo gracias a la inclusión de un apartado denominado “Decisiones Combinadas” que recoge aquellos trabajos que tratan sobre dos o más decisiones.

##### **4.3.2.1. Estructura y capacidad de la Red de LI**

Muchos de los trabajos consultados sobre modelos matemáticos aplicados a la LI, desarrollan un trabajo de investigación en el área de estructura y capacidad de la red de LI. En ellos, se ha detectado la existencia de dos formas diferentes de estructurar la red de LI; la red de LI propia y la red de LI colaborativa. A continuación, se comentan estas dos decisiones y los trabajos que las tratan.



#### 4.3.2.1.1. *Red de LI propia*

Generalmente, las compañías dimensionan su red de LI con la intención de conseguir los mayores beneficios, dando un servicio óptimo al cliente. Por ejemplo, en el trabajo de Salema *et al.* (2007), se plantea el dimensionamiento de la estructura de la red de LI, decidiendo principalmente sobre la apertura o no de las instalaciones que la componen (fábricas, almacenes y centros de desmontaje). Dicho trabajo busca el objetivo de minimizar los costes de funcionamiento de la red, teniendo en cuenta tipos de costes como apertura de centros, demanda satisfecha e insatisfecha, recuperación de materiales, etc.

Otro trabajo que sigue esta misma línea es el de El-Sayed *et al.* (2010), en donde se plantea también un modelo matemático basado en la configuración de la red de LI, decidiendo si sus instalaciones se abren o no y dónde se ubican. En este caso, el objetivo planteado pasa por maximizar el beneficio total esperado de la red, teniendo en cuenta los ingresos esperados por las ventas primeras (artículos nuevos), ventas segundas (artículos recuperados) y el total de costes esperados (fijos, materiales, fabricación, capacidad infrautilizada, escasez, compra, desensamblaje, remanufactura, reparación, desecho, transporte e inventario).

También se trata la decisión de configuración de la red de LI propia en el trabajo de Ashfari, *et al.* (2014), en el que se determina la ubicación óptima, el número y la capacidad de las instalaciones centrales y regionales para atender la demanda de los clientes.

#### 4.3.2.1.2. *Red de LI colaborativa*

Un claro ejemplo de configuración de la red de LI colaborativa se puede apreciar en el trabajo de Jianghong (2010), en el que se presentan diferentes formas de recogida de productos como son: recogida por los minoristas, por recolectores o sin reciclaje. En dicho trabajo, se muestra claramente la visión conjunta de la CdS puesto que las variables de decisión utilizadas están centradas en los beneficios de cada uno de los eslabones de esta, según se realice un estilo de recolección u otro.

También en el trabajo de Qian *et al.* (2011), se propone un modelo matemático que determina la estructura de una red de LI colaborativa. En concreto, se pretende determinar el número óptimo y ubicación de fábricas, minoristas y socios 3PL's en un contexto

determinado de *e-commerce*, tratando de minimizar los costes logísticos de todo el sistema considerado.

En relación al diseño de la estructura de la red de LI colaborativa, cabe destacar el trabajo de Achillas *et al.* (2012), quienes configuran la red a partir de la elección del tipo de contenedor y de su correspondiente socio, para la recogida de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

#### **4.3.2.2. Políticas Empresariales.**

Dentro de las decisiones sobre políticas empresariales se podrían destacar dos: la determinación de precios de los productos en sus diferentes situaciones (política de precios) y la designación de las actuaciones de la empresa con respecto a las devoluciones de los productos (política de devoluciones).

##### *4.3.2.2.1. Política de precios*

La política de precios a seguir en el ámbito de la LI se centra en determinar el precio más idóneo para los productos, especialmente los recuperados en el proceso de LI. Esta política de precios es tratada ampliamente en el trabajo de Gan *et al.* (2017) como decisión clave en el proceso de LI. En dicho estudio, se realiza una propuesta para el cálculo de precios de productos nuevos y remanufacturados con la intención de encontrar los precios óptimos, en canales de venta independientes, que puedan maximizar los beneficios.

##### *4.3.2.2.2. Política de devoluciones*

Mediante la política de devoluciones, la empresa determina las condiciones con las que acepta la entrega del producto por parte del cliente, con relación al estado del producto, plazos de devolución y reembolsos económicos, principalmente.

La política de devoluciones es el tipo de decisión que menos ha aparecido en la literatura consultada; no se ha encontrado ningún modelo centrado exclusivamente en ella, y sólo uno que combine la política de devoluciones con la política de precios.

#### **4.3.2.3. Planificación de la producción con productos recuperados**

Las decisiones que hacen referencia a la planificación de la producción con productos recuperados engloban principalmente trabajos relacionados con el establecimiento de cantidades de producción y composición de los productos ofrecidos, combinando

generalmente componentes recuperados y nuevos en la elaboración de los nuevos elementos.

Este tipo de trabajos suelen perseguir el objetivo de maximizar el beneficio esperado en la CdS, encontrando el equilibrio entre la red de LI y la de LD, teniendo en cuenta los ingresos totales a recibir menos los gastos derivados del plan de producción e inventario establecido.

La línea básica de este tipo de decisiones se aprecia perfectamente en el trabajo de Kuik *et al.* (2016), donde se plantea un modelo que ayuda a seleccionar los componentes, de entre los nuevos, reutilizados, reconstruidos y reciclados, cuando se remanufactura un producto, con el objetivo de maximizar el valor de los elementos recuperados.

El hecho de decidir sobre el tipo de producción a realizar y la configuración de los productos suele ir ligado a la determinación de las cantidades de producción e inventario, como elementos esenciales de la planificación de la producción. En este sentido, los trabajos de Desport *et al.* (2016); Kim *et al.* (2006) y Ramkumar *et al.* (2011) combinan ambos aspectos de la planificación en modelos matemáticos para minimizar los costes totales de la CdS, decidiendo de manera óptima, la cantidad de piezas que se procesan en cada lugar, el número de piezas compradas al subcontratista y el número de componentes que son recuperados para elaborar nuevos productos.

De esta forma, trabajos como los de Benedito y Corominas (2010); Jonrinaldi y Zhang, (2010); Kim *et al.* (2006); Panagiotidou *et al.* (2017) son ejemplos claros de estudios centrados en la determinación de cantidades óptimas de producción e inventario, con el objetivo de poder satisfacer la demanda concreta en cada periodo minimizando los costes logísticos globales.

#### **4.3.2.4. Determinación de rutas logísticas**

Las rutas logísticas a trazar por parte de los vehículos en la CdSI, es otro tipo de decisión clave identificada en la literatura analizada. Los modelos que abordan este tipo de decisión pretenden minimizar la distancia total recorrida entre los diferentes componentes de la red, Por ejemplo, este tipo de decisión es el núcleo del modelo matemático del trabajo de Erbao *et al.* (2008).

También existen trabajos, como los de Rahimi *et al.* (2016) y Soysal (2016) fundamentados en determinar las rutas logísticas a realizar, haciendo especial hincapié sobre las cantidades de producto a recoger y a entregar en cada punto de la CdSI.

#### **4.3.2.5. Disposición de productos**

La disposición de los productos recuperados o devueltos (o elegir el tratamiento a realizar), forma parte de una de las decisiones clave más determinantes en la literatura analizada. En este sentido autores como Gomes *et al.* (2008); Saadany and Jaber (2010); Saadany y Jaber (2011); Dhib *et al.* (2013); Saadany *et al.* (2013); Dhouib (2014) y Niknejad y Petrovic (2014), proponen en sus trabajos modelos matemáticos que deciden exclusivamente sobre las diferentes alternativas de disposición para el producto recuperado, con el objetivo de obtener el máximo rendimiento y minimizar los costes o aumentar los beneficios correspondientes.

#### **4.3.2.6. Decisiones combinadas**

En algunos casos, según se puede apreciar en la Tabla 4, los trabajos consultados abordan más de una categoría de decisiones. Por ejemplo, son numerosos los trabajos que tratan simultáneamente decisiones sobre la estructura y capacidad de la red de LI propia y la planificación de la producción con productos recuperados. En esta línea, trabajos como los de Ene y Öztürk (2014); Sajan *et al.* (2017); Salema *et al.* (2010); Faccio *et al.* (2014); Salema *et al.* (2006); Ko y Evans (2007); Kizilboga *et al.* (2013) y Das y Chowdhury (2012), plantean un diseño estratégico de la red propia, determinando el número óptimo, capacidad y ubicación de las diferentes instalaciones, junto con una planificación táctica/operativa de las cantidades a producir y almacenar.

También se suelen tratar las decisiones sobre la estructura de la red propia de LI junto con decisiones sobre el establecimiento de la ruta logística a realizar por parte de los productos. Es el caso, por ejemplo, de los trabajos de Jayaraman *et al.* (2003) y Piplani y Saraswat (2012), en donde se determina la configuración de la red propia de LI en función de la ruta de los vehículos, con la intención principal de minimizar los costes logísticos.

Asimismo, los estudios de Amin y Baki (2017); Demirel y Gökçen (2008); Özkır y Başlıgıl (2013); Pedram *et al.* (2017); Rezapour *et al.* (2015) y Zelos *et al.* (2012) combinan las decisiones correspondientes a la configuración de la red propia de LI, junto

con la planificación de la producción de productos recuperados y las rutas logísticas de productos entre los diferentes eslabones de la red de LI.

En trabajos como el de Qian *et al.* (2012), se propone un modelo matemático que aborda la decisión de configuración de la red de LI colaborativa en combinación con la decisión de planificación de producción con productos recuperados en cada punto de la red logística. Además de estas decisiones, en el trabajo de Pati *et al.* (2008) se combinan las rutas logísticas para marcar los flujos de productos entre las distintas instalaciones.

Otra forma de determinar la configuración de la red de LI colaborativa es la propuesta por Liu *et al.* (2017), basada en un modelo matemático que ayuda a determinar la estructura óptima de trabajo, comparando entre tres configuraciones diferentes de red de LI, combinada con la política de precios de los productos, que se van marcando según los costes de la estructura de la red.

Por otra parte, la decisión sobre la política de precios a seguir con los productos también se puede encontrar combinada con la decisión sobre la planificación de la producción de los productos recuperados, según se muestra en el trabajo de Han *et al.* (2016).

Otra combinación posible es la formada por la política de precios y la política de devoluciones. Ambas decisiones sobre políticas empresariales son expuestas en el caso de Yang *et al.* (2015), donde se establecen unas directrices para que los clientes puedan devolver el producto comprado al minorista o al fabricante, con la idea de establecer un equilibrio entre los precios de venta y de reembolso y el beneficio óptimo.

En el trabajo de Darbari *et al.* (2015), se muestra un modelo de implementación de LI con un triple desarrollo basado en las dimensiones de la sostenibilidad en una CdSI de ordenadores portátiles. En este caso, se contemplan tres objetivos a optimizar simultáneamente: costes de la red de LI, impacto ambiental e impacto social. Para ello, se determinan variables de decisión correspondientes a la estructura y capacidad de la red propia de LI, a la determinación del número óptimo de productos a desensamblar, dentro de la planificación de productos recuperados, y a la proporción de componentes a ser fabricados, desechados o reciclados, en base a las distintas alternativas de disposición posibles.

Estas mismas decisiones clave aparecen reflejadas en la publicación de Harraz y Galal (2011). En este caso, se diseña una red de LI para la recuperación de vehículos al final de

su vida útil, para la que se determinan cuándo las plantas y centros de trabajo deben abrir y con qué capacidad. Además, se determinan las cantidades de piezas a destinar en los diferentes tratamientos (reutilización, renovación, reciclaje y eliminación) al final de la vida útil de los vehículos.

Finalmente, con respecto a la decisión correspondiente a las alternativas de disposición, cabe destacar los trabajos de Inderfurth (2005) y Shi *et al.* (2011), en los que se aborda la elección de tratamiento como una decisión clave en sus modelos, en coordinación con la decisión sobre la planificación de la producción con productos recuperados.

Hasta el momento, las decisiones se han agrupado provisionalmente en cinco categorías, siguiendo un criterio de similitud, para poder presentarlas y explicarlas de una forma más estructurada y ordenada. Pero una vez presentadas y explicadas, siendo consciente de la existencia de dos esquemas de clasificación de decisiones en el ámbito de la Dirección de Operaciones en CdS ampliamente aceptados, procedería reclasificarlas para entender mejor su dimensión temporal y su alcance de aplicación, en base a estos esquemas de clasificación mucho más conocidos y extendidos.

#### **4.3.3. Clasificación de las Decisiones Clave de la LI**

Dentro del ámbito de la Dirección de Operaciones y la gestión de la CdS, una de las principales clasificaciones de decisiones es la que **hace referencia al horizonte temporal de planificación**. Según este criterio, las decisiones pueden ser **estratégicas, tácticas u operativas** (Bender *et al.*, 2002; Melo *et al.*, 2009; Schmidt y Wilhelm, 2000; Vidal y Goetschalckx, 1997).

Tradicionalmente, las **decisiones estratégicas** han ido destinadas a establecer los objetivos de la empresa y los planes logísticos a largo plazo, mientras que las decisiones tácticas conectan los objetivos y planes a largo plazo con los planes operativos, con una temporalidad a medio plazo. Por último, las decisiones operativas son aquellas que concretan los objetivos de la empresa determinando las actividades a desarrollar a corto plazo.

Cuando las decisiones son clasificadas en base al horizonte temporal, se entiende por **estratégicas** aquellas que son tomadas con la suficiente antelación como para poder determinar la planificación de las operaciones y el futuro de la empresa, generalmente en

un horizonte de entre tres y cinco años. Asimismo, el nivel estratégico trata con decisiones que tienen un efecto duradero en la empresa y no suelen ser modificadas habitualmente.

Una de las principales decisiones estratégicas sobre las que se basan los modelos matemáticos aplicados a la LI, es la configuración y estructura de la red (Cortés y Alarcón, 2018). En este sentido, con el objetivo de establecer una estructura de la red lo más rentable posible, los modelos analizados plantean mayoritariamente las siguientes decisiones a tomar:

- la selección, cantidad y/o tipología de socios externos
- la existencia y características de los centros componentes de la propia red

Otras decisiones que también podrían considerarse **estratégicas**, por hacer referencia a las políticas empresariales con carácter permanente a largo plazo, que se siguen son:

- la política de devoluciones
- la política o estrategia de precio

Por el contrario, aquellas decisiones que están focalizadas entre un medio y corto plazo se fundamentan en **medidas tácticas y operativas** respectivamente. La planificación táctica suele estar asociada a los objetivos de segundo nivel, subordinados a los grandes objetivos de la compañía, mientras que la planificación operativa viene ejecutada por los mandos operativos de la empresa y suelen tener una aplicación a muy corto plazo.

En nivel táctico de la CdS, encontraríamos decisiones, por ejemplo, sobre la gestión del flujo de materiales, incluidos los niveles de producción o inventario y a nivel operacional, la programación de las acciones rutinarias para asegurar los objetivos de la compañía (Schmidt y Wilhelm, 2000).

Ante la amplitud de acciones que se engloban bajo este tipo de decisiones y la dificultad de establecer la línea divisoria entre lo táctico y lo operativo, estas decisiones, se podrían englobar en una misma categoría conjunta denominada **decisiones tácticas – operativas**.

Algunos ejemplos de decisiones de este grupo detectadas en la literatura analizada son:

- **planificación de la producción a realizar y configuración del producto a ofrecer**; entendida como la selección del tipo componentes para configurar

productos recuperados y la determinación de cantidades/inventarios a producir, transportar y/o almacenar en cada uno de los componentes de la red de LI

- **la configuración de rutas logísticas de pedidos;** aunque muy relacionada con la estructura de la red de LI, se recogerían en este apartado aquellas decisiones relacionadas con la búsqueda del mejor itinerario para cada trazado en el ámbito de la LI
- **la elección de la mejor alternativa de disposición para los productos**

Por otra parte, las decisiones más importantes correspondientes a los sistemas logísticos, se **pueden clasificar en decisiones de diseño y decisiones de gestión de la red logística** (Mabert, 1998). Se entienden como **decisiones de diseño de la red de LI** aquellas centradas en establecer cómo se recoge los productos de los usuarios, dónde se inspeccionan dichos productos recuperados, así como dónde se clasifican y cómo son distribuidos los productos recuperados hacia los futuros clientes (Fleischmann *et al.*, 2000).

En base a esta clasificación, Barker y Zabinsky (2011) establecen un marco de trabajo en el que se clasifican las decisiones críticas con respecto al **diseño de la red de LI** en tres grandes escenarios: recolección, inspección y clasificación, y distribución.

En referencia a las **decisiones de gestión de la LI**, Srivastava (2008) realiza una clasificación y categorización de las operaciones más relevantes que se llevan a cabo a través de una amplia revisión de la literatura existente, estableciendo como principales operaciones de gestión las siguientes: gestión de inventario, planificación y programación de la producción y de las distintas alternativas de disposición y de gestión de residuos.

Tras la revisión de la literatura realizada, se puede observar que ambos tipos de clasificaciones de decisiones guardan cierta relación. Tal y como se aprecia en el trabajo de Barker y Zabinsky (2011), las principales decisiones con respecto al diseño de la red (apertura y ubicación de centros) se engloban como decisiones estratégicas por su trascendencia y planificación temporal. Del mismo modo, en el trabajo de Srivastava (2008), se observa cómo las operaciones más relevantes en referencia a las decisiones de gestión (planificación de la producción e inventario, alternativas de disposición y gestión de residuos), hacen clara referencia a decisiones tácticas-operativas.

En base a todo lo expuesto anteriormente, se muestra una tabla (Tabla 5) en la que se establece la relación entre las decisiones clave en el ámbito de la LI identificadas a partir



de la revisión de la literatura (columna central), y las principales clasificaciones genéricas de decisiones en un contexto de CdS comentadas, según la planificación temporal y según el ámbito de aplicación (columnas izquierda y derecha respectivamente).

Decisiones según planificación temporal	Decisiones clave en el ámbito de la LI	Decisiones según ámbito de aplicación
Estratégicas	Estructura y capacidad de la Red de LI - Red de LI propia - Red de LI colaborativa	Diseño
	Políticas empresariales - Política de precios - Política de devoluciones	
Tácticas - Operativas	Rutas logísticas	Gestión
	Planificación de la producción con productos recueprados	
	Decisión sobre Disposición	

**Tabla 5.** Clasificación de decisiones clave en el ámbito de la LI (Elaboración propia).

Como se puede apreciar, las decisiones estratégicas están directamente relacionadas con decisiones de diseño y las decisiones tácticas-operativas están más encuadradas como decisiones de gestión, siendo la decisión sobre las rutas logísticas la excepción a dicha relación, por ser considerada una decisión táctica-operativa en un ámbito de aplicación de diseño.

Considerando la necesidad de formalización del proceso de LI, adoptando además una eficiencia en las operaciones del proceso, el ámbito de interés del presente trabajo se centrará en las decisiones operativas, y más concretamente, debido a su importancia y complejidad, en la decisión sobre la disposición del producto.

#### 4.4. Conclusiones

Tras la presentación del concepto de Logística Inversa, parece beneficioso integrar la LI en el funcionamiento cotidiano de la empresa, siendo fundamental para ello conocer el PLI.

En el presente capítulo, inicialmente, se ha proporcionado una visión general del proceso, en base a tres etapas comunes a todas las redes de LI como son: la etapa inicial de **recogida y transporte** del producto desde el cliente hasta la empresa; la etapa intermedia de **inspección y valoración**, donde la empresa revisa cada uno de los productos y

determina, a través de la DD el tratamiento a realizar; la etapa final donde se ejecuta **la disposición del producto** en base a la alternativa escogida previamente para cada producto.

Posteriormente, tratando de aportar una visión más completa del PLI, se exponen, por un lado, los principales eventos que inician el proceso de LI, distinguiendo entre las devoluciones y los productos recuperados y, por otro, todas las posibles alternativas de disposición que se manejan en el PLI, distinguiendo entre aquellas que cuentan con la finalidad de recuperación de valor (interviniendo o no sobre el producto) o sin la finalidad de recuperar valor y eliminarlo de manera controlada.

No obstante, con el objetivo de formalizar y mejorar la eficiencia del proceso, se ha determinado como necesario el estudio de las decisiones clave del PLI.

Tras una primera revisión bibliográfica sobre las decisiones del PLI, no obteniéndose información suficiente al respecto, se ha optado por analizar las variables de decisión de MM en un contexto de LI.

A partir del análisis de dichas variables de decisión, se han identificado una serie de decisiones clave de LI que se han descrito y agrupado, por semejanza, en las siguientes cinco categorías:

- **Estructura y capacidad de la Red de LI:** Red de LI propia y Red de LI colaborativa.
- **Políticas empresariales:** Política de precios y política de devoluciones.
- **Planificación de la producción con productos recuperados.**
- **Determinación de rutas logísticas.**
- **Disposición del producto.**

Una vez identificadas y descritas las principales decisiones, se han catalogado en base a las clasificaciones de decisiones más comunes en el ámbito de la CdS, es decir, entre **estratégicas, tácticas u operativas** y entre decisiones de diseño o de gestión.

Después del estudio sobre las decisiones del proceso de LI realizado en este capítulo, se deduce que una de las decisiones más importantes del proceso de LI es **la elección de la alternativa de disposición del producto (DD)**, debido a que se tomará para cada producto que inicie el flujo inverso, será una de las primeras que se tomarán y, por tanto, influirá significativamente en todos los componentes de la CdS, condicionando a las

demás decisiones. Dicha decisión se convierte en el eje central de esta tesis doctoral, analizándose en profundidad en el capítulo siguiente.

#### 4.5. Referencias

- Achillas, C., Aidonis, D., Vlachokostas, C., Moussiopoulos, N., Baniyas, G., & Triantafyllou, D. (2012). A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.004>
- Afia, N. (2010). A stochastic model for forward – reverse logistics network design under risk. *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.040>
- Agrawal, S, Singh, R., Resources, Q. M.-, Recycling, C. and, & 2016, U. (2016). Outsourcing decisions in reverse logistics: sustainable balanced scorecard and graph theoretic approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 41–53.
- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 76-92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>
- Amin, S. H., & Baki, F. (2017). A facility location model for global closed-loop supply chain network design. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 316–330. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.08.030>
- Ashfari, H., Sharifi, M., ElMekkawy, T. Y., & Peng, Q. (2014). Facility location decisions within integrated forward/reverse logistics under uncertainty. *Procedia CIRP*, 17, 606–610. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.092>
- Banguera, L. A., Sepúlveda, J. M., Ternero, R., Vargas, M., & Vásquez, Ó. C. (2018). Reverse logistics network design under extended producer responsibility: The case of out-of-use tires in the Gran Santiago city of Chile. *International Journal of Production Economics*, 205, 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.006>
- Barker, T. J., & Zabinsky, Z. B. (2011). A multicriteria decision making model for reverse logistics using analytical hierarchy process. *Omega*, 39(5), 558–573. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2010.12.002>
- Bender, T., Hennes, H., Kalcsisc, K., Melo, M. T., & Nickel, S. (2002). Location Software and Interface with GIS and Supply Chain Management. *Facility Location: Applications and Theory*, 233–274

- Benedito, E., & Corominas, A. (2010). Optimal manufacturing and remanufacturing capacities of systems with reverse logistics and deterministic uniform demand. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 3(1), 33–53. <https://doi.org/10.3926/jiem.2010.v3n1.p33-53>
- Cherkaoui, H., Godichaud, M., & Amodeo, L. (2015). Multi-Objective Capacitated Disassembly Scheduling with Lost Sales. *Iores*, 172–178. <https://doi.org/10.5220/0005231901720178>
- Chinda, T., & Ammarapala, V. (2016). Decision-making on reverse logistics in the construction industry. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 38(1), 7–14. <http://rdo.psu.ac.th/sjstweb/journal/38-1/38-1-2.pdf>
- Clift, R., Doig, A., & Finnveden, G. (2000). The application of Life Cycle Assessment to Integrated Solid Waste Management. Part 1 - Methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 78(4), 279–287. <https://doi.org/10.1205/095758200530790>
- Cortés, P., & Alarcón, F. (2018). Identification of reverse logistics decision types from mathematical models. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 11(2), 239–249. <https://doi.org/10.3926/jiem.2530>
- Darbari, J. D., Agarwal, V., Chaudhary, K., & Jha, P. C. (2015). Multi-criteria decision approach for a sustainable reverse logistics network under fuzzy environment. In *2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)*, 1–7. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEOM.2015.7093813>
- Das, K., & Chowdhury, A. H. (2012). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.07.010>
- Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K., van Wassenhove, L. N. (2004). *Reverse Logistics-Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains*. Springer Science & Business Media
- Demirel, N. Ö., & Gökçen, H. (2008). A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39 (11–12), 1197–1206. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1290-7>
- Desport, P., Lardeux, F., Lesaint, D., Liret, A., Di Cairano-Gilfedder, C., & Owusu, G. (2017). Model and combinatorial optimization methods for tactical planning in closed-loop supply chains. *Proceedings - 2016 IEEE 28th International Conference on Tools with Artificial Intelligence, ICTAI*, 888–895. <https://doi.org/10.1109/ICTAI.2016.0134>
- Dhib, S., Loukil, T., Addouche, S. A., & Mhamedi, A. El. (2013). Selecting configuration of reverse logistics network using sustainability indicators. *Modeling, Simulation and Applied*

- Optimization (ICMSAO)*, 2013 5th International Conference On, (2008), 1–5.  
<https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2013.6552567>
- Dhouib, D. (2013). Fuzzy Macbeth method to analyze alternatives in automobile tire wastes reverse logistics. *International Conference on Advanced Logistics and Transport, ICALT*, 321–326. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAdLT.2013.6568479>
- Dhouib, D. (2014). An extension of MACBETH method for a fuzzy environment to analyze alternatives in reverse logistics for automobile tire wastes. *Omega*, 42(1), 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.003>
- Ehrental, J. C. F., & Stölzle, W. (2013). An examination of the causes for retail stockouts. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 43(1), 54–69. <https://doi.org/10.1108/09600031311293255>
- El Saadany, A. M. A., & Jaber, M. Y. (2011). A production/remanufacture model with returns' subassemblies managed differently. In *International Journal of Production Economics*, 133, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.08.014>
- El Saadany, A. M. A., Jaber, M. Y., & Bonney, M. (2013). How many times to remanufacture? *International Journal of Production Economics*, 143, 598–604. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.11.017>
- Ene, S., & Öztürk, N. (2014). Open Loop Reverse Supply Chain Network Design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 109, 1110–1115. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.596>
- Erbao, C., Mingyong, L., & Kai, N. (2008). A Differential Evolution & Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up and Time Windows. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 10576–10581. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01791>
- España, Gobierno de. (2018). España Circular 2030—Estrategia Española de Economía Circular.
- Faccio, M., Persona, A., Sgarbossa, F., & Zanin, G. (2014). Sustainable SC through the complete reprocessing of end-of-life products by manufacturers: A traditional versus social responsibility company perspective. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 359–373. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.03.027>
- Fernández, A., Gil, M., & Torre, P. (2004). Logística inversa y medio ambiente. *Mc Graw-Hill Interamericana de España*. Retrieved from <http://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/5352>

- Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R., & Flapper, S. D. P. (2000). A characterisation of logistics networks for product recovery. *Omega*, 28(6), 653–666. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(00)00022-0)
- Gan, S. S., Pujawan, I. N., Suparno, & Widodo, B. (2017). Pricing decision for new and remanufactured product in a closed-loop supply chain with separate sales-channel. *International Journal of Production Economics*, 190, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.016>
- Genchev, S. E., Glenn Richey, R., & Gabler, C. B. (2011). Evaluating reverse logistics programs: A suggested process formalization. *The International Journal of Logistics Management*, 22(2), 242–263. <https://doi.org/10.1108/09574091111156578>
- Gomes, C. F. S., Nunes, K. R. A., Helena Xavier, L., Cardoso, R., & Valle, R. (2008). Multicriteria decision making applied to waste recycling in Brazil. *Omega*, 36(3), 395–404. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.07.009>
- Gu, Y., & Liu, Q. (2013). Research on the application of the internet of things in reverse logistics information management. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 6(4), 963–973.
- Guarnieri, P., e Silva, L. C., & Levino, N. A. (2016). Analysis of electronic waste reverse logistics decisions using Strategic Options Development Analysis methodology: A Brazilian case. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1105–1117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.025>
- Han, X., Wu, H., Yang, Q., & Shang, J. (2016). Reverse channel selection under remanufacturing risks: Balancing profitability and robustness. *International Journal of Production Economics*, 182, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.013>
- Harraz, N. A., & Galal, N. M. (2011). Design of Sustainable End-of-life Vehicle recovery network in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 2(3–4), 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2011.09.006>
- Hernández, J. E., Poler, R., Mula, J., & Lario, F. C. (2011). The Reverse Logistic Process of an Automobile Supply Chain Network Supported by a Collaborative Decision-Making Model. *Group Decision and Negotiation*, 20(1), 79–114. <https://doi.org/10.1007/s10726-010-9205-7>
- Huscroft, J. R., Hazen, B. T., Hall, D. J., Skipper, J. B., & Hanna, J. B. (2013). Reverse logistics: Past research, current management issues, and future directions. *International Journal of Logistics Management*, 24(3), 304–327. <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2012-0024>

- Inderfurth, K. (2005). Impact of uncertainties on recovery behavior in a remanufacturing environment. A numerical analysis. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 35(5), 318–336. <https://doi.org/10.1108/09600030510607328>
- Jayaraman, V., Patterson, R. A., & Rolland, E. (2003). The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*, 150, 128–149. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00497-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00497-6)
- John, S. T., Sridharan, R., & Kumar, P. N. R. (2017). Multi-period reverse logistics network design with emission cost. *International Journal of Logistics Management*, 28(1), 127–149. <https://doi.org/10.1108/IJLM-08-2015-0143>
- Jonrinaldi, & Zhang, D. Z. (2010). Optimal integrated production and inventory cycles in a whole green manufacturing supply chain network with coordination. In *The 40th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCIE.2010.5668191>
- Kim, Kibum, Song, I., Kim, J., & Jeong, B. (2006). Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment. *Computers and Industrial Engineering*, 51(2), 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.02.008>
- Kizilboga, G., Mandil, G., Genevois, M. E., & Zwolinski, P. (2013). Remanufacturing network design modeling: A case of diesel particulate filter. *Procedia CIRP*, 11, 163–168. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.07.048>
- Ko, H. J., & Evans, G. W. (2007). A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. *Computers and Operations Research*, 34(2), 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.004>
- Krumwiede, D. W., & Sheu, C. (2002). A model for reverse logistics entry by third-party providers. *Omega*, 30(5), 325–333. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(02\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(02)00049-X)
- Kuik, S. S., Kaihara, T., & Fujii, N. (2016). Product Recovery Configuration Decisions for Achieving Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, 41, 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.195>
- Kumar, S., & Malegeant, P. (2006). Strategic alliance in a closed-loop supply chain, a case of manufacturer and eco-non-profit organization. *Technovation*, 26(10), 1127–1135. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2005.08.002>
- Liu, L., Wang, Z., Xu, L., Hong, X., & Govindan, K. (2017). Collection effort and reverse channel choices in a closed-loop supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 144, 492–500.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.126>

- Mabert, V. A., & Venkataramanan, M. A. (1998). Special Research Focus on Supply Chain Linkages: Challenges for Design and Management in the 21st Century. *Decision Sciences*, 29(3), 537–552. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1998.tb01353.x>
- Makarova, I., Shubenkova, K., & Pashkevich, A. (2018). The Concept of the Decision Support System to Plan the Reverse Logistics in Automotive Industry. *2018 26th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM 2018*, 76–81. IEEE. <https://doi.org/10.23919/SOFTCOM.2018.8555760>
- Man, J. (2010). Research on the collection policy of integrated supply chain based on remanufacture. *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2010*, 3,144–147. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2010.520>
- Marin, V. (2015). *Mundo FESC. Revista Mundo FESC* (Vol. 5). Retrieved from <http://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/76>
- Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management - A review. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401–412. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.007>
- Mitra, S. (2007). Revenue management for remanufactured products. *Omega*, 35(5), 553–562. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2005.10.003>
- Niknejad, A., & Petrovic, D. (2014). Optimisation of integrated reverse logistics networks with different product recovery routes. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.03.034>
- Özkır, V., & Başlıgil, H. (2013). Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment. *Journal of Cleaner Production*, 41, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.013>
- Panagiotidou, S., Nenes, G., Zikopoulos, C., & Tagaras, G. (2017). Joint optimization of manufacturing/remanufacturing lot sizes under imperfect information on returns quality. *European Journal of Operational Research*, 258(2), 537–551. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.044>
- Pati, R. K., Vrat, P., & Kumar, P. (2008). A goal programming model for paper recycling system. *Omega*, 36(3), 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.04.014>
- Pedram, A., Yusoff, N. Bin, Udoncy, O. E., Mahat, A. B., Pedram, P., & Babalola, A. (2017). Integrated forward and reverse supply chain: A tire case study. *Waste Management*, 60,



460–470. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.029>

Piplani, R., & Saraswat, A. (2012). Robust optimisation approach to the design of service networks for reverse logistics. *International Journal of Production Research*, 50(5), 1424–1437. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.571942>

Prajapati, H., Kant, R., & Shankar, R. (2019). Bequeath life to death: State-of-art review on reverse logistics. *Journal of Cleaner Production*, 211, 503–520. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.187>

Qian, X., Han, Y., Da, Q., & Stokes, P. (2012). Reverse logistics network design model based on e-commerce. *International Journal of Organizational Analysis*, 20(2), 251–261. <https://doi.org/10.1108/19348831211227864>

Rahimi, M., Baboli, A., & Rezik, Y. (2016). Sustainable Inventory Routing Problem for Perishable Products by Considering Reverse Logistic. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 949–954. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.898>

Ramkumar, N., Subramanian, P., Narendran, T. T., & Ganesh, K. (2011). Erratum to “A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling” [Appl. Math. Modell. 34 (2010) 655–670]. *Applied Mathematical Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.05.026>

Rezapour, S., Farahani, R. Z., Fahimnia, B., Govindan, K., & Mansouri, Y. (2015). Competitive closed-loop supply chain network design with price-dependent demands. *Journal of Cleaner Production*, 93, 251–272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.095>

Rubio Lacoba, S. (2003). El sistema de logística inversa en la empresa: análisis y aplicaciones, 299. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=305>

Saadany, A. M. A. El, & Jaber, M. Y. (2010). Computers & Industrial Engineering A production / remanufacturing inventory model with price and quality dependant return rate. *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 352–362. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.01.017>

Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1063–1077. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.032>

Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2010). Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 336–349.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.08.002>

Salema, M. I., Póvoa, A. P. B., & Novais, A. Q. (2006). A warehouse-based design model for reverse logistics. *Journal of the Operational Research Society*, 57(6), 615–629. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602035>

Sangwan, K. S. (2017). Key Activities, Decision Variables and Performance Indicators of Reverse Logistics. *Procedia CIRP*, 61, 257–262. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.185>

Schmidt, G., & Wilhelm, W. E. (2000). Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: A review and discussion of modelling issues. *International Journal of Production Research*, 38(7), 1501–1523. <https://doi.org/10.1080/002075400188690>

Shi, J., Zhang, G., & Sha, J. (2011). Optimal production planning for a multi-product closed loop system with uncertain demand and return. *Computers and Operations Research*, 38(3), 641–650. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.08.008>

Soysal, M. (2016). Closed-loop Inventory Routing Problem for returnable transport items. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.07.001>

Srivastava, S. K. (2008). Network design for reverse logistics. *Special Issue on Logistics: New Perspectives and Challenges*, 36(4), 535–548. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2006.11.012>

Thierry, Martijn and Salomon, Marc and Nunen, Jo Van and Wassenhove, L. Van. (1995). Strategic issues in product recovery management. *Long Range Planning*, 28(3), 120. [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(95\)91628-8](https://doi.org/10.1016/0024-6301(95)91628-8)

Torretta, V., Rada, E. C., Ragazzi, M., Trulli, E., Istrate, I. A., & Cioca, L. I. (2015). Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. *Waste Management*, 45, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.018>

Veritas, B. (2009). Logística integral. Fundación Confemetal. Retrieved from [https://scholar.google.es/scholar?cluster=17820554731072962250&hl=es&as\\_sdt=2005&scioldt=0,5](https://scholar.google.es/scholar?cluster=17820554731072962250&hl=es&as_sdt=2005&scioldt=0,5)

Vidal, C. J., & Goetschalckx, M. (1997). Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98(1), 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)80080-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)80080-X)

- Wang, L., Goh, M., Ding, R., & Mishra, V. K. (2018). Improved Simulated Annealing Based Network Model for E-Recycling Reverse Logistics Decisions under Uncertainty. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2018/4390480>
- Wei, L., & Gu, W. (2015). Decision-making on reverse logistics for manufacturers: An evolutionary game theory perspective. *International Conference on Logistics, Informatics and Service Science, LISS*, 1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/LISS.2015.7369638>
- Yang, F., Hu, P., Zhao, F., & Hu, C. (2015). Customer returns model in a dual-channel supply chain. *Journal of Modelling in Management*, 10(3), 360–379. <https://doi.org/10.1108/JM2-03-2015-0014>
- Yu, H., & Solvang, W. D. (2018). A new two-stage stochastic model for reverse logistics network design under government subsidy and low-carbon emission requirement. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 90–94. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8289857>
- Yunfeng, M., & Zhonghua, P. (2016). Research on recovery model of the fourth party logistics considering government subsidy. *13th International Conference on Service Systems and Service Management, ICSSSM*, 1-4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2016.7538480>
- Zeballos, L. J., Gomes, M. I., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2012). Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains. *Computers and Chemical Engineering*, 47, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.06.034>
- Zhang, X. Le, Potter, A., & Xiao, H. J. (2008). A research to uncertainty in reverse logistics decision making. *Proceedings of the International Conference on Information Management, Proceedings of the International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII, 1*, 195–198. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIII.2008.50>
- Zhang, Y., & Feng, Y. (2007). A selection approach of reverse logistics provider based on fuzzy AHP. *Proceedings - Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD*, 3, 479–482. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2007.119>

# **Capítulo 5. Decisión sobre Disposición del Producto**

## 5.1. Introducción

La decisión sobre disposición del producto es conocida más comúnmente en castellano como decisión sobre el tratamiento a aplicar. En cambio, la traducción literal sería decisión sobre la disposición (DD). En este sentido, atendiendo a la equivalencia de ambos conceptos, se utilizarán ambos términos indistintamente en la presente tesis.

Independientemente de cómo se le denomine, una de las principales actividades del PLI es decidir cuál es la mejor disposición o tratamiento para cada producto, siendo una actividad muy difícil de tomar adecuadamente para muchas empresas porque carecen de información al respecto. De hecho, la DD es una de las decisiones clave del PLI menos trabajadas en la literatura (Agrawal *et al.*, 2015).

La falta de conocimiento sobre la DD impide aprovechar la oportunidad de negocio que supone el tratamiento de productos recuperados y la transformación hacia un modelo de negocio más sostenible.

En este capítulo, se pretende ofrecer información esencial sobre la DD de los productos devueltos o recuperados, para que se puedan tener en cuenta simultáneamente los aspectos de sostenibilidad: económicos, ambientales y sociales. Esto permitirá una mejor y más sostenible gestión de la LI, mejorando así la eficiencia y sostenibilidad de la empresa.

Para ello, en la sección 5.2, se justifica el interés de la DD, razonando todos los matices que definen dicha decisión, en cuanto a complejidad e importancia se refiere. En la sección 5.3, se describen los principales aspectos a considerar en la DD, especialmente los que tienen que ver con la sostenibilidad (económicos, ambientales y sociales) y se razona la importancia del uso de los MM como herramienta de ayuda a la toma de decisiones de disposición del producto. Por último, en la sección 5.4, se detallan las principales conclusiones a las que se ha llegado tras la realización del presente capítulo.

## 5.2. Decisión sobre la Disposición de Productos

Desde que se inicia el proceso de LI, la elección de la disposición o tratamiento, para el producto recuperado o devuelto se convierte en una de las decisiones más **complejas e importantes** del proceso de LI. A continuación, se explican ambas características:

### 5.2.1 Complejidad de la DD

La DD se considera una decisión compleja por el **elevado grado de incertidumbre** que lleva asociado el producto recuperado de LI (Farahani *et al.*, 2019; Kannan *et al.*, 2009; Wadhwa *et al.*, 2009). Dicha incertidumbre es clasificada en cuatro ámbitos diferentes, según Rubio Lacoba (2003): cuantitativo (cuántos productos a recuperar), cualitativo (estado en el que se encuentran los productos), temporal (momento en el que se recuperan) y espacial (lugar).

Otra circunstancia que aumenta la complejidad de la DD es que cada producto precisa de un **tratamiento independiente**, concreto y único, debido a sus propias características (Agrawal *et al.*, 2015). Además, esta circunstancia se agrava por el hecho de que, en muchas ocasiones, los tratamientos no están identificados ni suele existir una manera sistemática o estándar de cuantificarlos para evaluar su idoneidad (beneficios y costes).

Al mismo tiempo, la DD debe contemplar **una gran cantidad de factores** relacionados con: ingeniería, negocios, medio ambiente y factores sociales (Ziout *et al.*, 2014). Dichos factores provienen de un amplio espectro de intereses, no siempre “alineados”, de los principales stakeholders y deben estar actualizados, para poder optar por la mejor solución.

Junto a todas estas circunstancias, cabe añadir que, en la mayoría de las situaciones, la DD requiere de **agilidad y rapidez en la respuesta** para que los gestores del PLI puedan responder en tiempo real al cliente.

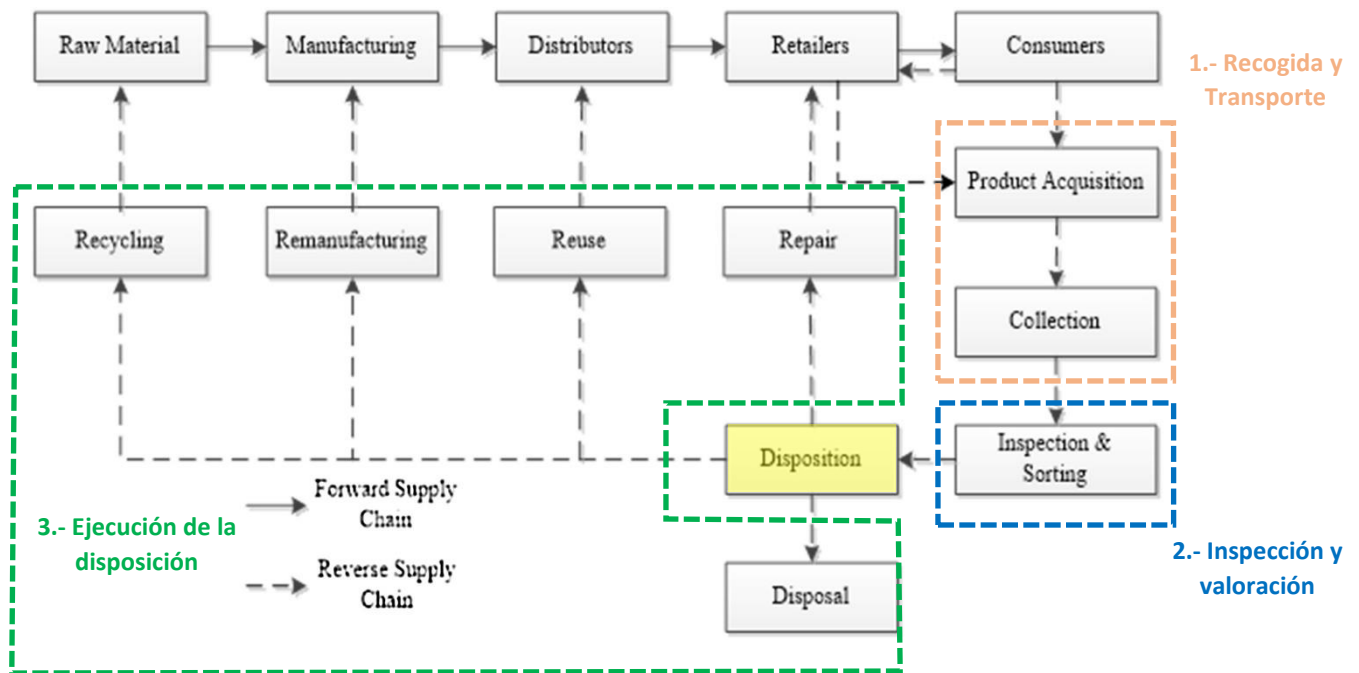
### 5.2.2 Importancia de la DD:

La importancia de la DD se puede entender mejor si se analiza desde el punto de vista del impacto que supone para la CdS y para el cliente:

#### **Importancia de la DD desde la perspectiva de la CdS**

La DD tiene un importante papel en la mejora de la eficiencia operativa de la CdS, por su impacto sobre el flujo de materiales y las operaciones a realizar a lo largo de la CdS. En la figura siguiente (Figura 16) se muestra un diagrama de un PLI, combinado con LD, donde se destacan las tres etapas esenciales del PLI (recuadros de línea discontinua) identificadas en el capítulo anterior. En ella, se

aprecia cómo la DD (en amarillo) se sitúa entre la segunda etapa (inspección y valoración, con marco azul) y la tercera (ejecución de la disposición, con marco verde).



**Figura 16.** Diagrama esquemático de un PLI combinado con LD (Adaptado de Agrawal y Singh, 2019)

En la figura también se observa que, desde la decisión de disposición del producto, salen diferentes flechas, representando las diferentes alternativas de tratamiento de los productos. Precisamente, este aspecto, demuestra que la DD condiciona aguas arriba el resto de las actividades del PLI, impactando fuertemente en áreas como, por ejemplo, la de la **logística**, la cual se ve condicionada por la necesidad de transporte y manipulación que precisa cada producto recuperado. La necesidad de intervención sobre los productos recuperados mediante tratamientos como la reparación, el reacondicionamiento y la remanufactura, influyen en gran medida sobre el área de **fabricación y programación de la producción**. Los **almacenes y stock** también se ven influenciados por la necesidad de almacenaje de los productos o componentes entre las distintas etapas del PLI. Además, el desensamblaje de los productos en componentes que pueden ser reaprovechados para la elaboración de nuevos productos o reciclaje, afecta al área de **compras** de la empresa.

### **Importancia de la DD desde la perspectiva del Cliente**

Existe un gran número de situaciones relacionadas con el PLI en las que la compañía necesita aportar una respuesta rápida al cliente. Por ejemplo, cuando un producto es entregado en mal estado o un producto debe ser recogido y sustituido por otro. En estos casos, la rapidez en dar una respuesta al cliente impactará sobre la satisfacción de este y sobre su fidelidad hacia la empresa, influyendo en la imagen que se tiene del servicio y del negocio y, en consecuencia, influyendo en el rendimiento de esta (Khor y Udin, 2011).

Además de ser compleja e importante, la DD es una decisión fundamental para que el PLI sea sostenible. Por ello, con la intención de mejorar el grado de sostenibilidad del PLI y promover el cambio de la empresa hacia un modelo más sostenible, la DD debería ser tomada considerando las tres dimensiones de la sostenibilidad simultáneamente.

Se considera importante en esta tesis marcar las pautas para poder tomar la DD desde un enfoque de sostenibilidad. Por esa razón, en el apartado siguiente, se van a identificar los **principales aspectos de sostenibilidad a considerar** para poder tomar la mejor DD posible.

#### **5.3.Aspectos a considerar en la DD para que sea sostenible.**

Tomar decisiones desde un enfoque que considere la sostenibilidad en todo su alcance conlleva, debido a la naturaleza **multidimensional** de la sostenibilidad, analizar la decisión desde el triple prisma económico, ambiental y social.

En la literatura referente a la LI existe gran cantidad de MM que sirven de ayuda a la toma de decisiones. A partir de estos modelos, se pueden **analizar los distintos parámetros que condicionan a las variables de decisión y determinar cómo se valora la DD desde las tres dimensiones de la sostenibilidad.**

A continuación, se realiza una revisión de la literatura sobre la valoración del impacto de las alternativas de la DD en las tres dimensiones de la sostenibilidad.

##### **5.3.1 Valoración económica de las alternativas de disposición en la DD**

Habitualmente, los directivos y responsables de operaciones toman decisiones que tienen repercusiones económicas (Eslava, 2003). En este sentido, la **dimensión económica** está



presente en todos los MM analizados, siendo en muchos casos la única dimensión que se valora.

Cuando se utiliza la dimensión económica para valorar los objetivos de MM, se suelen plantear dos situaciones diferentes: minimización de costes o maximización de beneficios.

En la **minimización de costes** se valoran parámetros referentes a los costes de las acciones correspondientes a cada alternativa. Ejemplos de este tipo de planteamiento se pueden observar en trabajos como los de Mangun y Thurston (2002) y Wadhwa *et al.* (2009), que utilizan parámetros como el coste de reciclaje del producto, costes de desensamblaje o coste de reparación, entre otros.

Por el contrario, en el planteamiento de **maximización de beneficios**, a parte de los costes de las acciones de cada alternativa, se tienen en cuenta los ingresos esperados a partir de cada decisión. Este enfoque económico es más habitual en la literatura y se puede apreciar en los trabajos de: Dehghanian y Mansour (2009), González y Adenso-Díaz (2005), Hula *et al.* (2003), Jun *et al.* (2007), Krikke *et al.* (1998), Lebreton y Tuma (2006), Lee *et al.* (2001), Mota *et al.* (2015), Shaharudin *et al.* (2017), Teunter (2006), Xanthopoulos y Iakovou (2009), Ziout *et al.* (2014) y Zuidwijk y Krikke (2008).

De cualquier forma, independientemente del objetivo perseguido (minimizar costes o maximizar beneficios), la influencia de cada alternativa de disposición sobre los aspectos económicos, se puede cuantificar según el resultado de aplicar una alternativa y compararla con el resultado de aplicar otra alternativa, cuantificando la diferencia entre los ingresos y los costes que se han generado o se prevé que se generen (Ortegon *et al.*, 2013).

### 5.3.2 Valoración ambiental de las alternativas de disposición en la DD

La **dimensión ambiental** presente en los MM del ámbito de la LI se plantea de manera homogénea en todos los modelos, mediante el objetivo de minimización el impacto ambiental.

En el actual contexto de globalización, las cuestiones ambientales han adquirido gran importancia para la competitividad de las compañías, haciendo que las CdS sean, cada vez, más eficientes y ecológicas (Singh *et al.*, 2016). Con el aumento de la preocupación

por la emergencia climática en los últimos años, se reconoce que los problemas de contaminación ambiental, que acompañan al desarrollo industrial, deberían abordarse simultáneamente en el proceso operacional de la gestión de la CdS (Sheu *et al.*, 2005). De hecho, la mayoría de países en Europa han aplicado legislación ambiental que impone a los fabricantes de productos, la responsabilidad de los flujos logísticos inversos, incluido los productos usados y los desechos inducidos por la fabricación, con el objetivo de reintegrar dichos productos usados en los procesos productivos y cerrar así su ciclo de vida (González-Torre *et al.*, 2004).

Por tanto, se considera imprescindible conocer y medir el impacto ambiental de cada una de las alternativas de disposición posibles, si se pretende minimizar el impacto ambiental que se genera con el tratamiento del producto recuperado.

**El principal problema de la cuantificación del impacto ambiental radica en establecer la idoneidad de los sistemas de medición utilizados, debiendo ser estos lo más objetivos posible** (Cloquell-Ballester *et al.*, 2006). A este respecto, el punto crítico está en agregar los diferentes **indicadores de impacto ambiental** para obtener una única cifra de impacto ambiental que permita comparar las distintas alternativas u opciones (Consonni *et al.*, 2005).

La evaluación cuantitativa del impacto ambiental de las acciones de LI, generalmente se realiza a través de dos tipos de estrategias diferentes: por un lado, cuantificaciones dadas por profesionales expertos y, por otro lado, estrategias centradas en cuantificar el impacto según indicadores de estimación de impacto ambiental.

La primera opción se basa, por lo tanto, en la opinión de los expertos, por lo que se convierte en una opción fuertemente subjetiva. De ahí la importancia de contar con expertos de referencia. Esto puede suponer un hándicap a la hora de considerar el impacto ambiental en una herramienta genérica que pueda servir de ayuda en la toma de decisión sobre la disposición en todos los casos de recuperación y devolución de productos. El problema de la valoración ambiental por indicadores se centra, justamente, en determinar qué indicadores utilizar, que sean representativos, válidos y fiables. Además, de cómo agregar los datos ambientales, en el caso que se obtengan diferentes parámetros.

Analizando la literatura científica para buscar cómo otros autores han establecido los indicadores y el sistema de agregación de datos se observa, por ejemplo que Tang y Zhou

(2012) apuntan que los aspectos ambientales en los modelos cuantitativos incluyen principalmente el consumo de recursos naturales y la emisión de desechos y contaminación. Siguiendo esta misma línea, Brandenburg y Seuring (2014) argumentan que los aspectos ambientales comprenden principalmente aspectos orientados a los insumos (cantidad y tipología de consumo de energía o suministros utilizados) y aspectos orientados a los resultados (impacto ambiental, contaminación, desechos, residuos).

La cuantificación del nivel de impacto ambiental según indicadores requerirá, en primer lugar, determinar cuáles son aquellos indicadores de referencia que van a servir para poder realizar la medición. Además, teniendo datos ambientales en diferentes parámetros (nivel de CO<sub>2</sub>, calidad del aire, contaminación atmosférica, ...), se deberán agregar los datos para poder obtener un único valor de impacto ambiental. En este sentido, **la dificultad de la valoración ambiental por indicadores se centra en establecer los indicadores y el sistema de agregación de datos a utilizar.**

A este respecto, existe un acuerdo generalizado entre industria, gobiernos y otras partes interesadas en que los problemas ambientales y su impacto deben considerarse desde una perspectiva del ciclo de vida de los productos. Por ello, varios investigadores adoptaron una metodología basada en el análisis del ciclo de vida de los productos para caracterizar los aspectos ambientales (Dehghanian y Mansour, 2009). Dicha metodología es conocida bajo las siglas LCA por el término en inglés: Life Cycle Assessment.

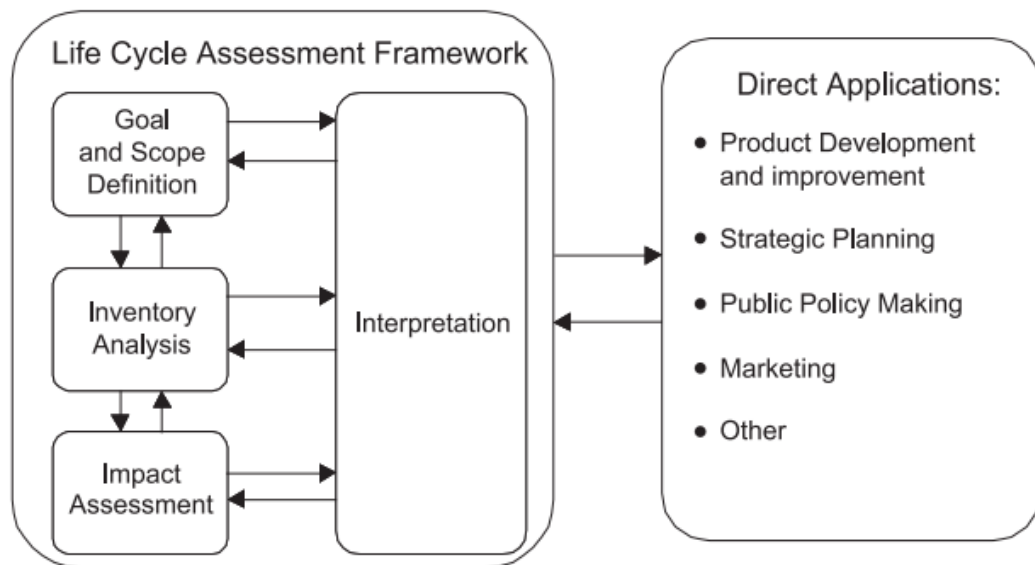
LCA es una metodología estandarizada internacionalmente que puede dar cuenta de los insumos y emisiones relacionadas con el ciclo de vida de un producto o un proceso. Generalmente, se considera como una buena herramienta para obtener una cuantificación objetiva de todos los parámetros ambientales relacionados con los diferentes escenarios de la gestión de LI (Arena *et al.*, 2003).

La norma internacional ISO 14040-43 define LCA como “una compilación y evaluación de los insumos y el posible impacto ambiental de un proceso, producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida” (Arena *et al.*, 2003).

En un principio, la metodología LCA se creó para analizar productos, pero posteriormente se ha ido ampliando su radio de actuación, llegando incluso a ser utilizado para valorar el tratamiento de residuos (Assamoi y Lawryshyn, 2012), lo cual supone un enfoque sensiblemente diferente.

La metodología LCA se difunde internacionalmente a través de dos estudios realizados por diferentes autores europeos. En un primer estudio, Rebitzer *et al.* (2004) describen cómo definir y modelar el ciclo de vida de un producto, así como los métodos y herramientas disponibles para compilar los datos asociados de desechos, emisiones y consumo de recursos en su ciclo de vida. El segundo estudio, plasmado en el artículo de Pennington *et al.* (2004), destaca cómo los profesionales e investigadores proporcionan indicadores de los diferentes impactos, atribuibles a los productos en la evaluación de sus ciclos de vida.

El marco genérico de trabajo de LCA está dividido principalmente en cuatro etapas. En la primera etapa se define el alcance y el objetivo del análisis, definiendo la unidad funcional a trabajar, mientras que, en la segunda etapa, se realiza un inventario cuantitativo de todas las entradas y salidas del sistema. Posteriormente, en una tercera etapa, se evalúa y se clasifica el impacto. Por último, en una cuarta etapa, se interpretan los resultados obtenidos (Rebitzer *et al.*, 2004). Se pueden observar las principales etapas del marco de trabajo, así como las aplicaciones directas más habituales de la metodología LCA en la figura siguiente (Figura 17):



**Figura 17.** Fases y aplicaciones de la metodología LCA (Rebitzer *et al.*, 2004)

Aunque la metodología LCA aporta una buena visión holística de las consecuencias ambientales de un proceso, producto o servicio, resulta fundamental conocer sus limitaciones y asumir que la información ambiental que reporta no es completa, ni absolutamente objetiva ni precisa.

En este sentido, la principal limitación radica en que los resultados dependen de las decisiones metodológicas, como las suposiciones hechas en la elaboración y las fuentes de datos de entrada, que pueden verse alteradas por los valores y preferencias de los profesionales (Ekvall *et al.*, 2007).

La metodología LCA se ha desarrollado para calcular un solo valor global del impacto ambiental, pero dicho proceso suele ser muy complicado y requiere mucho tiempo, de manera que solo puede realizarse adecuadamente gracias a un experto en gestión ambiental (Dehghanian y Mansour, 2009). Dicha circunstancia, que puede ser un gran impedimento en la mayoría de las ocasiones, puede ser superada aportando un método genérico.

En este sentido, existen varias metodologías genéricas de evaluación de impacto ambiental LCA que difieren principalmente en el enfoque de los indicadores. De esta forma existen: por un lado métodos de punto intermedio, los cuales consiguen valorar el impacto ambiental en gran cantidad de parámetros y, por otro lado, métodos de punto final, los cuales simplifican la interpretación de LCA otorgando una puntuación total, al incluir un método de ponderación de parámetros (Bicer *et al.*, 2016; Dreyer *et al.*, 2008).

Con respecto a los métodos de evaluación de impacto ambiental de punto final, investigadores europeos propusieron un método para utilizar un índice estándar que representase el impacto ambiental de un producto o un proceso genérico. Dicho índice se llama Eco-indicador y está basado en el concepto de la “huella ecológica” (Goedkoop y Spriensma, 2001).

El Eco-indicador ha sido utilizado ampliamente en la literatura científica para valorar el impacto ambiental. En su primera versión adoptó el término de Eco-indicador 95 y, posteriormente, se implementó una mejora y ampliación del método para dar lugar a una versión más completa, bajo el término de Eco-indicador 99. Dicha versión se ha convertido en una de las metodologías más utilizadas en los modelos de optimización (Mota *et al.*, 2015).

Este índice utiliza datos del inventario cuantitativo del impacto ambiental referentes a tres indicadores ambientales: salud humana, calidad ecológica y consumo de recursos. Además, estas tres categorías se combinan de manera ponderada (40%, 40% y 20% respectivamente), obteniendo así un solo valor de impacto. De esta forma, los

valores de los Eco-indicadores se ponderan y se homogeneizan utilizando como base de parámetro de medida el “punto Eco-indicador” (Pt), el cual representa una centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano europeo medio.

El Eco-indicador de un proceso, por tanto, consiste en un número que indica el impacto ambiental de dicho proceso, a partir de los datos obtenidos del Análisis de su Ciclo de Vida, de manera que cuanto mayor es el indicador, mayor es el impacto ambiental.

Los valores de impacto ambiental según el Eco-indicador 99 se clasifican en cinco grupos (Goedkoop y Spriensma, 2000):

- **Impacto ambiental por el tipo de Material:** los indicadores de los materiales se miden según el valor de 1 kg de material.
- **Impacto ambiental por procesos de producción:** Los Eco-indicadores de los procesos de producción hacen referencia a las emisiones ocasionadas durante el proceso y a la de la generación de energía necesaria.

De esta forma, el valor correspondiente se puede calcular teniendo en cuenta los kilogramos de cada tipo de material sobre los que se va a intervenir y el proceso de producción que se va a llevar a cabo.

- **Impacto ambiental por procesos de transporte:** Los procesos de transporte incluyen el impacto de las emisiones generadas por la extracción y producción de combustible y la generación de energía de ese combustible en el transporte. Generalmente, el valor del impacto ambiental por el transporte se mide por toneladas y kilómetros, ambas agregadas en una unidad compuesta (ton-km), es decir, las toneladas transportadas por el número de kilómetros recorridos. Esto es así porque ambas cualidades influyen, cuanta más carga y más distancia, más servicio, por tanto, el impacto se asigna a ese servicio compuesto.

En este sentido, para la valoración del transporte, se indicará el tipo de transporte a utilizar, la distancia recorrida y el peso de la mercancía que se transporta.

- **Impacto ambiental por procesos de generación de energía:** Estos indicadores se refieren a la extracción y la producción de combustibles. En este sentido, se determinan unidades para electricidad y calor. La

electricidad se cuantifica teniendo en cuenta los diferentes tipos de combustible empleados para generarla.

- **Impacto ambiental por procesos de eliminación:** Dentro de los distintos escenarios de eliminación, la valoración correspondiente al impacto ambiental viene dada por el tipo de actividad a realizar, en base a los kilogramos y/o los materiales componentes del producto.

En algunos métodos de eliminación se dan cifras negativas, debido que en el proceso se crea un producto intermedio que se puede reciclar o reutilizar. En estos casos, se entiende que los flujos de energía y materiales son considerados como beneficio ambiental. En este sentido, cuando se trata de reciclado, por ejemplo, la deducción es mayor que el impacto ambiental de un proceso, dando lugar a cifras negativas.

Un claro ejemplo de la utilización del Eco-indicador para valorar el impacto ambiental en las alternativas de disposición de productos, es el trabajo de Lee *et al.* (2001) donde se estudia la mejor alternativa para cada componente de una máquina de café que llega al final de su vida útil. Con los objetivos de minimizar los costes y el impacto ambiental de cada componente al final de su vida útil, en dicho trabajo, aplican los listados del Eco-indicador 95 para valorar el impacto ambiental en tres alternativas posibles: reciclaje primario, reciclaje secundario y vertido.

Actualmente, existen valores del Eco-indicador de la mayoría de los procesos y materiales, de forma que hay referencias de cada indicador base por kilogramo para cada tipo de material, para cada proceso de elaboración y para cada forma de eliminación (Goedkoop y Spriensma, 1999).

A pesar de que el uso del Eco-indicador actualmente está ampliamente aceptado y se utiliza regularmente para cuantificar el impacto ambiental de cada tratamiento de recuperación de productos (Dehghanian y Mansour, 2009), durante los últimos años, se ha reflexionado mucho sobre las limitaciones de las tablas del Eco-indicador 99, en cuanto a actualización y variedad de datos se refiere (Audenaert *et al.*, 2012; Pushkar, 2013)

A la vista de las limitaciones del Eco-indicador y tratando de obtener un marco de trabajo común en el que se utilice los indicadores de punto final y los indicadores intermedios,

se desarrolló un método de evaluación del impacto del ciclo de vida llamado ReCiPe 2008 (Goedkoop *et al.*, 2009). Dicho método proporciona aspectos de caracterización armonizados en los niveles de punto medio y punto final.

Es decir, ReCiPe 2008 es una evolución del Eco-indicador 99 (que utiliza aspectos de punto final), combinado con CML (que utiliza aspectos de punto intermedio), que es el otro método ampliamente reconocido para la evaluación del ciclo de vida, siendo fiel a la metodología LCA expuesta en la Figura 17 (Mota *et al.*, 2015).

Tiempo después, Huijbregts *et al.* (2017) desarrollaron una actualización del método ReCiPe 2008 proporcionando aspectos de caracterización representativos a escala global, en lugar de escala europea, considerando la posibilidad de que una serie de categorías de impacto pudiesen implementar aspectos de caracterización a escala nacional. Dicha actualización fue denominada como ReCiPe 2016.

Los valores que hacen referencia a dicha actualización se recogen en multitud de bases de datos, las cuales consiguen para ampliar las referencias existentes del Eco-indicador para la utilización de diversos métodos en las mismas categorías de impacto ambiental, como indicadores de punto final, estructurando los indicadores de impacto ambiental en los mismos grupos de clasificación.

### 5.3.3 Valoración social de las alternativas de disposición en la DD

Tras la publicación del influyente “**Brundtland Report**” (Brundtland, 1989), donde se definió de manera generalizada el **objetivo del desarrollo sostenible** como “*la mejora de la calidad de vida de la población actual, de manera que no tenga un impacto negativo en las generaciones futuras, garantizando el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social*”, las empresas han estado evaluando formas de valorar la sostenibilidad de las operaciones (Dumay *et al.*, 2010), para poder ir mejorándolas. Las operaciones son valoradas a través de la medición del rendimiento de las actividades en base a indicadores (Chee-Tahir y Darton, 2010).

Como ya se ha comentado anteriormente, para valorar el nivel de sostenibilidad de las operaciones se requiere la medición simultánea de su impacto en las tres dimensiones de la sostenibilidad. Esta medición del impacto parece ser una práctica común en lo que respecta a la dimensión económica, y también para la dimensión ambiental, objeto de



mayor interés desde principios de siglo XXI. Como consecuencia de ello, los indicadores del rendimiento ambiental y económico suelen estar relativamente bien establecidos, pudiéndose combinar entre ellos para valorar la sostenibilidad de los productos, servicios y CdS, de manera generalizada. Sin embargo, la dimensión social ha recibido menos atención, tanto en la literatura como en la práctica. De hecho, hasta hace bien poco, no estaba bien definida y resultaba mucho más difícil de valorar (Mota *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2015), tendiendo a valorar la sostenibilidad únicamente en base al impacto económico y ambiental, en la mayoría de los casos.

Pasar por alto la dimensión social de la sostenibilidad puede suponer un grave impacto adverso en la CdS (Badri *et al.*, 2017) e impide que las decisiones sean verdaderamente sostenibles, porque no son consideradas las tres dimensiones simultáneamente (Rajeev *et al.*, 2017).

Los aspectos sociales son generalmente más difíciles de identificar, y sobre todo de cuantificar, con respecto a los aspectos económicos y ambientales, porque generalmente **se reflejan en contextos macroeconómicos**, pero no a nivel microeconómico de una empresa, y menos respecto a una alternativa concreta de disposición (Brandenburg *et al.*, 2014).

De este modo, para poder cuantificar el impacto social a nivel de las alternativas de disposición habrá que seleccionar los indicadores más adecuados que reflejen de manera clara y sencilla la repercusión social de cada alternativa.

**La principal dificultad para valorar dicho impacto social se basa en cómo seleccionar dichos indicadores sociales. Y algo aún más complicado, es cómo se consigue valorar cuantitativamente el impacto de cada alternativa sobre cada indicador social.**

Por todo ello, en el presente apartado, se pretende identificar, en primer lugar, los aspectos sociales más representativos en el ámbito de la LI y, en segundo lugar, proponer indicadores de impacto social representativos con respecto a dichos aspectos en el contexto de la DD.

Ante la escasa presencia de parámetros sociales en los MM analizados, se realiza una búsqueda bibliográfica sobre trabajos recientes que hayan considerado la dimensión

social para la toma de decisiones en un contexto de LI, con el objetivo de identificar los aspectos sociales que se tienen normalmente en cuenta en el ámbito de la LI.

Para ello, se han consultado las bases de datos Science Direct y Scopus, con las cadenas de búsqueda “Social Factors” y “Reverse Logistics”, seleccionando, finalmente 18 trabajos relevantes desde el año 2009 hasta el 2019.

**Un primer grupo** de estos trabajos ha considerado aspectos sociales que han sido seleccionados desde marcos generales para la sostenibilidad, como por ejemplo, el marco propuesto por la Norma Internacional de Orientación sobre Responsabilidad Social-ISO 26000 (ISO, 2010). Trabajos como los de Dehghanian y Mansour (2009) se basan en dicha Norma Internacional para determinar los aspectos sociales.

Otro marco general o de referencia utilizado para seleccionar los aspectos sociales es el propuesto por la Global Report Initiative (GRI, 2006). El GRI presenta unas directrices claras que pueden ser utilizadas en estudios de sostenibilidad para las empresas (Taleizadeh *et al.*, 2019). Trabajos como los de Nikolaou *et al.* (2013) y Taleizadeh *et al.* (2019) se apoyan en el informe GRI para determinar los aspectos sociales en sus investigaciones. Existen incluso trabajos como los de Pishvae *et al.* (2012) que se basan inicialmente en la ISO-26000 y, posteriormente, en el informe GRI, adaptando los aspectos de ambos marcos para sus estudios. Otros marcos de trabajo generales nombrados en la literatura analizada son PESTEL (Ziout *et al.*, 2014) y el Guidelines for Social Life Cycle Assesment of products (2009) (Iacovidou *et al.*, 2017).

**Un segundo grupo** de trabajos escogen los aspectos sociales a partir de los propuestos en trabajos similares o de temática relacionada. Es el caso de Devika *et al.* (2014), Dutta *et al.* (2019) y Govindan *et al.* (2016) que tienen como referencia el trabajo de Pishvae *et al.* (2012) para el diseño de una red de LI. O el trabajo de Gu *et al.* (2019), que se centra también en el diseño de una red, utilizando como referencia otros trabajos de la misma temática.

También Chileshe *et al.* (2018) y Halldórsson *et al.* (2009) utilizan como referencia otros trabajos que proponen aspectos sociales, aunque en el ámbito de la construcción y del transporte respectivamente.

**En otro grupo** estarían los trabajos que han obtenido los aspectos sociales combinando marcos generales y artículos de temática relacionada, como por ejemplo Bal y Satoglu (2018) y Sarkis *et al.* (2010).

**Finalmente**, también se han consultado trabajos que proponen sus propios aspectos sociales (o no especifican de dónde los obtienen), como son los de Agrawal y Singh (2019), Feitó *et al.* (2017), Fonseca *et al.* (2010) y Ramos *et al.* (2014).

En la Tabla 6 se presentan los trabajos consultados, ordenados por el origen de los aspectos sociales seleccionados, y se describen brevemente, tanto el contexto en el que se desarrollan, como los aspectos sociales considerados en cada uno de ellos.

Origen de los aspectos sociales	Autor	Contexto	Aspectos Sociales
<b>Marcos generales para la sostenibilidad</b>	Dehghanian y Mansour, (2009)	Diseño de la red de recuperación de productos <i>End-of-life</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empleo</li> <li>• Condiciones de trabajo</li> <li>• Riesgo del producto</li> <li>• Desarrollo local</li> </ul>
	Iacovidou <i>et al.</i> (2017)	Análisis de factores para sistemas de recuperación de productos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo socioeconómico</li> <li>• Creación de empleo y condiciones de trabajo</li> </ul>
	Nikolaou <i>et al.</i> (2013)	Marco de evaluación social en los sistemas de LI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prácticas laborales y trabajo decente</li> <li>• Derechos humanos</li> <li>• Sociedad</li> <li>• Responsabilidad del producto</li> </ul>
	Pishvae <i>et al.</i> (2012)	Diseño de la red de LI de bucle cerrado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguridad en el consumo</li> <li>• Condiciones de trabajo</li> <li>• Desarrollo de la comunidad</li> </ul>
	Taleizadeh <i>et al.</i> (2019)	Planificación de una red de LI sostenible	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salud y seguridad de empleados</li> <li>• Creación de empleo</li> <li>• Satisfacción del cliente</li> <li>• Satisfacción del trabajador</li> <li>• Desarrollo de la sociedad</li> </ul>
	Ziout <i>et al.</i> (2014)	Influencia social entre las opciones de recuperación de productos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Influencia sobre las personas destino de los productos</li> <li>• Influencia sobre la sociedad en general</li> </ul>

PARTE II. ESTADO DEL ARTE.  
 Capítulo 5. Decisión sobre Disposición del Producto.

<b>Trabajos similares o temática relacionada</b>	Chileshe <i>et al.</i> (2018)	Análisis de la influencia de impulsores de LI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Imagen de la empresa</li> <li>• Desarrollo de la comunidad</li> </ul>
	Devika <i>et al.</i> (2014)	Diseño de la red de LI de bucle cerrado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oportunidades de trabajo</li> <li>• Seguridad en los/as trabajadores/as</li> </ul>
	Dutta <i>et al.</i> (2019)	Diseño de una red de LI para devoluciones de <i>e-commerce</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Creación de puestos de trabajos</li> <li>• Seguridad para los/as empleados/as</li> </ul>
	Govindan <i>et al.</i> (2016)	Diseño de una red de LI de bucle cerrado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oportunidades laborales creadas</li> <li>• Condiciones de seguridad en el trabajo</li> </ul>
	Gu <i>et al.</i> (2019)	Construcción de redes de LI genéricas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Imagen ambiental de la empresa</li> <li>• Atención sobre los consumidores</li> </ul>
	Halldórsson <i>et al.</i> (2009)	Indicadores sociales para las rutas de transporte en sistemas de recuperación de productos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción de la congestión del tráfico</li> <li>• Ahorro de energía</li> <li>• Respeto a las normas de conducción y tiempos de descanso</li> </ul>
<b>Combinación de marcos generales y trabajos de temática relacionada</b>	Bal y Satoglu (2018)	Diseño de una red sostenible de CdS de bucle cerrado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recursos humanos internos (creación de empleo y estabilidad laboral)</li> </ul>
	Sarkis <i>et al.</i> (2010)	Cuestiones sociales en el campo de la LI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RRHH internos</li> <li>• Población externa</li> <li>• Participación de <i>stakeholders</i></li> <li>• Aspectos macrosociales</li> </ul>
<b>Aspectos propios (o sin especificar origen)</b>	Agrawal y Singh (2019)	Examinar el efecto de la DD en la industria electrónica india	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quejas de la comunidad</li> <li>• Salud y seguridad del consumidor</li> <li>• Participación de los <i>stakeholders</i></li> <li>• Estabilidad laboral</li> <li>• Donaciones a la comunidad</li> <li>• Beneficios para los empleados</li> </ul>
	Feitó-Cespón <i>et al.</i> (2017)	Rediseño de una red de LI para el reciclaje de productos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel de servicio al cliente: grado cumplimiento, confiabilidad y flexibilidad</li> </ul>
	Fonseca <i>et al.</i> (2010)	Análisis del impacto social en el diseño de una red de LI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desarrollo de la zona</li> <li>• Creación de puestos de trabajo</li> </ul>
	Ramos <i>et al.</i> (2014)	Configuración de la red de LI y sus rutas de transporte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Igualdad de condiciones entre los/as trabajadores/as de la empresa</li> </ul>

**Tabla 6.** Detalles sobre la revisión de la literatura de los aspectos sociales en la LI (Elaboración propia).

Una vez identificados los aspectos sociales utilizados en los trabajos consultados, se procede a su análisis, comprobando la descripción que cada autor proporciona de ellos y buscando los criterios o razones por los que dichos aspectos han sido utilizados. Este

análisis ha permitido comprobar que se utilizan distintos aspectos sociales y éstos se escogen en ocasiones, sin un criterio o una justificación clara. Esta heterogeneidad y arbitrariedad en la elección de los aspectos sociales complica la comparación de las decisiones, impidiendo saber cuál de ellas permite alcanzar mayor grado de sostenibilidad.

Por otra parte, se ha podido comprobar que, si bien ninguno de los aspectos sociales identificados se utiliza en todos los trabajos consultados, algunos se utilizan en muchos de ellos, mientras que otros aspectos se utilizan en pocos.

### 5.3.4 Soluciones de programación matemática ante problemas de Optimización Multi-Objetivo

A parte del **triple objetivo de sostenibilidad**, el hecho de que existan varias alternativas de disposición, gran cantidad de aspectos influyentes, con varios criterios de decisión posibles y que, además, participen varios decisores, provoca la necesidad **de crear un marco de trabajo que facilite la toma de decisión sobre la DD a aplicar**, de la manera más objetiva posible.

En este contexto, una solución es diseñar modelos de programación matemática que permitan cumplir diferentes objetivos al mismo tiempo, cuando el enfoque no es tanto alcanzar la situación de equilibrio, sino más bien compensar objetivos en conflicto, hallando la solución que más se aproxime al punto ideal (Seuring, 2013).

A continuación, en la Tabla 7, se muestran los **diferentes métodos de programación matemática que se han utilizado para tomar la decisión sobre la disposición de productos en los trabajos consultados:**

---

<i>Año</i>	<i>Autor</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Método</i>
2008	<i>Staikos y Rahimifard</i>	<i>Determina el mejor destino disposición para calzado usado</i>	<i>Método Analytic Hierarchy Process (AHP)</i>
2008	<i>Zuidwijk y Krikke</i>	<i>Disposición sobre pantallas de computadoras</i>	<i>Modelo de programación entera</i>
2009	<i>Wadhwa et al.</i>	<i>Determina la alternativa de recuperación de productos</i>	<i>MCDM basado en la teoría de conjuntos difusos (FAHP)</i>

**PARTE II. ESTADO DEL ARTE.**  
**Capítulo 5. Decisión sobre Disposición del Producto.**

2014	Ziout et al.	Selección de opción de recuperación de productos EOL	Método Analytic Hierarchy Process (AHP)
2015	Vahabzadeh et al.	Analiza el impacto ambiental de las actividades de disposición de la LI	Método Fuzzy-Vikor
2016	Agrawal et al.	Seleccionar la mejor alternativa de disposición para productos devueltos de telefonía móvil	Teoría de grafos y enfoque matricial
2018	Singh y Agrawal	Priorización de estrategias de disposición en una empresa de teléfonos	Metodología Fuzzy-TOPSIS
2019	Farahani et al.	Disposición de productos eléctricos/electrónicos al final de su vida útil (PC's)	Programación no lineal de enteros mixtos (MINLP)

**Tabla 7.** Métodos MCDM aplicados a la DD (Elaboración propia).

Respecto a los trabajos analizados que plantean métodos MCDM aplicados a la DD, a continuación, se muestra (Tabla 8) un pequeño resumen sobre la valoración que hacen de la sostenibilidad, indicando si desarrollan o no un enfoque de sostenibilidad en sus estudios y qué dimensiones de la sostenibilidad son utilizadas para determinar la mejor disposición del producto:

Año	Autor	Sostenibilidad	Económico	Ambiental	Social
2008	Staikos y Rahimifard	No	X	X	
2008	Zuidwijk y Krikke	No	X		
2009	Wadhwa et al.	No	X	X	
2014	Ziout et al.	Si	X	X	X
2015	Vahabzadeh et al.	Si		X	
2016	Agrawal et al.	No	X	X	
2018	Singh y Agrawal	No	X		
2019	Farahani et al.	No	X	X	

**Tabla 8.** Enfoque de sostenibilidad en los Métodos MCDM aplicados a la DD (Elaboración propia).

Como se puede comprobar en Tabla 8, el criterio económico es el criterio mayoritario que se ha utilizado en la elección de la DD, siendo incluso el único en algunos casos. Sin embargo, los estudios que abordan cuestiones sociales son escasos, corroborando las afirmaciones de Brandenburg *et al.* (2014) y Seuring (2013).

A la vista de los resultados, para completar un cambio hacia modelos más sostenibles, las empresas deberían considerar, de manera integral, las tres dimensiones de la sostenibilidad (Ziout *et al.*, 2014), con un mayor enfoque en la medición del impacto social a lo largo de la CdS (Rajeev *et al.*, 2017).

Considerando las tres dimensiones de la sostenibilidad, se fuerza a encontrar una solución basándose en la optimización multi-objetivo (MOO). La MOO ha sido aplicada en problemas donde es necesario tomar decisiones óptimas, entre dos o más objetivos en conflicto. En la MOO se habla del concepto de optimalidad, referido a encontrar la mejor solución posible o una buena aproximación a esta, teniendo en cuenta una serie de restricciones y/o limitaciones presentes (Konak *et al.*, 2006).

Por ello, en los **problemas de MOO**, no existe siempre un único resultado que optimice todas las funciones objetivo, sino que existe un conjunto (a veces infinito) de soluciones donde uno de sus objetivos no se puede alcanzar de manera óptima sin sacrificar otro (Cambero y Sowlati, 2014).

En aquellos procesos de toma de decisiones multiobjetivo **en los que interviene un decisor (o grupo de decisores) para escoger una solución, entre un conjunto de posibles alternativas y basándose en una serie de preferencias**, se puede resolver el problema multi-objetivo con diferentes técnicas (Cuartas Torres, 2009)

Haciendo uso de la clasificación propuesta por Cohon y Marks (1975), se mencionan algunas de las técnicas de solución más comunes para la MOO. Dichos autores clasifican las técnicas de solución, según el momento en el que el decisor humano introduce sus preferencias. Diferenciando tres tipos de técnicas diferentes: A-priori, Interactivas o A-posteriori. Estos tres tipos de técnicas se explican a continuación:

- **Técnicas A-Priori.** En este tipo de técnicas, las preferencias de los decisores son introducidas al inicio del proceso de toma de decisión, antes de realizar la búsqueda de la solución.

Una de las técnicas más divulgadas de este tipo se trata de la programación por metas, la cual tiene como propósito minimizar la desviación entre el valor conseguido y el objetivo propuesto inicialmente por el decisor (Charnes, Cooper, y Ferguson, 1955). La programación por compromiso es otra técnica englobada en este apartado (Zeleny, 1973), muy parecida a la anterior, en la que se propone hallar una solución o conjunto de ellas que estén lo más cercano posible a un punto ideal propuesto por el decisor o dado por las coordenadas de los valores óptimos de los diferentes objetivos del problema. Dicho punto suele ser generalmente inalcanzable, ya que, si fuera alcanzable, no habría conflicto de objetivos y se dispondría de la solución óptima.

Otro tipo de métodos A-Priori, son aquellos en los que el decisor define previamente la importancia que le da a cada función objetivo, agregándolas en una sola función de utilidad o de valor (Smith *et al.*, 2000), o como restricciones en una sola función objetivo. Dicha técnica se conoce como Ordenamiento Lexicográfico.

Los métodos A-Priori, resultan muy interesantes cuando se tienen muy claras las preferencias y no hay riesgo de alteración en función de las modificaciones de los datos.

El principal inconveniente de los métodos A-Priori es que se desconoce el comportamiento del sistema y, por tanto, resulta difícil mostrar unas preferencias antes de iniciar el proceso.

- **Técnicas Interactivas.** En este tipo de técnicas, se introducen las preferencias según avanza el proceso de resolución. Por tanto, el decisor interactúa continuamente con el método buscando la solución preferida.

En el desarrollo de las técnicas englobadas en este grupo, el responsable de la toma de decisiones expresará sus preferencias tras generar cada conjunto de soluciones de Pareto, eligiendo la mejor solución hasta ese momento, pudiendo generar un nuevo conjunto de soluciones o detener la optimización en cualquier momento (Mardle y Miettinen, 2006).



Estos métodos cuentan con la ventaja de que el decisor puede ir calibrando sus preferencias según avanza el proceso. Sin embargo, pueden requerir un gran esfuerzo al decisor (Cuartas Torres, 2009).

- **Técnicas A-Posteriori.** En este tipo de técnicas, las preferencias de los decisores se introducen una vez ya se han obtenido un grupo de posibles soluciones. De esta forma, primero se realiza la búsqueda y luego se toman las decisiones sobre la solución a elegir.

Dichas técnicas son resueltas en gran cantidad de ocasiones a través de métodos de ponderación, como el propuesto por Zadeh, (1963), en el que la solución viene determinada por la optimización de la suma ponderada de las funciones objetivos. De esta forma se consigue convertir el problema multi-objetivo en mono-objetivo.

Otro método, basado en convertir el problema en mono-objetivo es el método de las restricciones (Marglin, 1967), donde se escoge una de las funciones objetivo para ser optimizada y las otras se incluyen como restricciones de esta primera.

En los casos en los que los problemas multi-objetivo son difíciles de resolver por tener gran cantidad de variables o por tener un gran número (o incluso infinito) de alternativas posibles, el tiempo de resolución puede crecer exponencialmente y su desarrollo puede ser difícil de abordar mediante las técnicas clásicas de programación matemática (Méndez Babey, 2008). Para este tipo de situaciones, así como en los casos en los que el problema a optimizar sea matemáticamente complejo con funciones no lineales, se ha desarrollado otro tipo de métodos, conocidos como metaheurísticos (Cuartas Torres, 2009). Dichos métodos desarrollan **algoritmos eficientes** que encuentran “buenas soluciones”, aproximadas a la solución óptima.

Una de las técnicas más conocidas para diseñar los algoritmos heurísticos son los algoritmos evolutivos (*Evolutionary algorithms*). Desde hace mucho tiempo, los algoritmos evolutivos son utilizados de manera extensa como herramientas de búsqueda y optimización en campos como la ciencia, el comercio o la ingeniería, siendo su principal factor de éxito su poca especificidad, su facilidad de uso y su perspectiva global (Goldberg, 1989).

Dado que la estructura de una solución varía de un caso a otro, una solución a un problema en particular puede ser representada de varias maneras. En los métodos clásicos de

búsqueda y optimización, todas las variables de decisión suelen representarse a través de vectores y los algoritmos suelen trabajar sobre dicho vector para crear un nuevo vector de solución. Los algoritmos evolutivos, y más concretamente una clase de ellos llamados algoritmos genéticos (AG), utilizan la representación de cadena binaria para sus variables de decisión (Deb *et al.*, 2010; Olivera, 2015).

La representación clásica, que se usa en el citado AG, consiste en una cadena o vector binario de un tamaño limitado, que puede adoptar un número limitado de soluciones. El uso de los AG se ha visto incrementado para resolver problemas de optimización multi-objetivo, debido a su fortaleza de trabajo simultáneo con un elevado número de posibles soluciones y poder de obtención de resultados satisfactorios.

Por todo ello, ante la necesidad de aportar una solución que satisfaga el triple objetivo de la sostenibilidad, podría ser interesante considerar el diseño de un proceso de solución basado en la optimización multi-objetivo.

## **5.4. Conclusiones**

En el presente capítulo se ha destacado la DD de los productos devueltos o recuperados como la decisión más determinante en el contexto de la LI, por ser una decisión compleja e importante.

Se considera una decisión compleja por su elevada incertidumbre, porque precisa un tratamiento independiente, único y concreto para cada producto devuelto o recuperado y porque está influenciada por distintos aspectos como son la ingeniería, los negocios, el medio ambiente y los aspectos sociales, a veces contrapuestos entre sí, que además provienen de diferentes partes interesadas en el proceso (fabricantes, gestores de LI, usuarios finales y administraciones). Además de todas estas características, la DD es más compleja cuando suele precisar de gran agilidad y rapidez en la respuesta al cliente.

Además de compleja, la DD es considerada una decisión importante por su gran impacto sobre la CdS, ya que condiciona el resto del proceso de LI, el impacto en el cliente, en la imagen de la empresa y, por consecuencia, en los costes de la empresa, a parte de que es importante también porque tiene un gran impacto en el grado de sostenibilidad del negocio.

Tras una revisión bibliográfica de los MM aplicados a la LI, se han determinado los parámetros de sostenibilidad que se tienen en cuenta en las decisiones de LI. Dicha

revisión, desvela que todos los **trabajos incorporan aspectos económicos** para la elección del tratamiento, e incluso, en algunos casos, como el único aspecto a considerar. Además del factor económico, **el factor ambiental también se utiliza mucho en la toma de decisiones sobre la disposición y, desde hace aproximadamente una década, se están empezando a incluir los aspectos sociales en la DD**, completando así el triple enfoque de la sostenibilidad. Dicho carácter multidimensional de la DD, junto con el resto de las características señaladas anteriormente, justifican la elección de MM para la ayuda en la toma de la DD. Por ello, se han analizado los principales MM aplicados a la DD para comprobar cómo consideran el enfoque de la sostenibilidad y mostrar la necesidad de diseño de herramientas de ayuda a la toma de la DD desde un enfoque sostenible y eficiente.

Por último, se justifica la necesidad de elaborar un proceso de solución basado en la MOO para obtener la solución más adecuada en cada caso, de manera que se optimice el resultado contemplando el triple objetivo de la sostenibilidad.

## **5.5. Conclusiones sobre el Estado del Arte**

Después de los tres capítulos que componen la parte II de la tesis dedicada al Estado del Arte, se exponen, a continuación, las principales conclusiones extraídas:

- No existe uniformidad ni estandarización en las operaciones del PLI.
- Pocos trabajos consideran los tres pilares de la sostenibilidad para tomar la DD, fundamentalmente por falta de consideración de los aspectos sociales.
- Ante la necesidad de adoptar decisiones eficientes desde un enfoque sostenible integral, se considera conveniente desarrollar herramientas matemáticas de ayuda a la toma de la DD que consideren la triple dimensión de la sostenibilidad.
- Tampoco existen metodologías ni marcos de referencia que ayuden en la formalización del PLI y en el desarrollo de modelos matemáticos.

Por todo ello, en los capítulos siguientes se trabajará sobre la propuesta de un Marco de Referencia para el desarrollo integrado de un PLI con herramientas que ayuden a la toma de decisiones sobre cómo elegir la mejor disposición, en base a la consideración simultánea de aspectos económicos, ambientales y sociales, como componentes del triple enfoque de sostenibilidad. Asimismo, dicho Marco de Referencia facilitará la adaptación de los modelos genéricos, incluidos en el marco, a situaciones concretas.

## 5.6. Referencias

- Agrawal, S., & Singh, R. K. (2019). Analyzing disposition decisions for sustainable reverse logistics: Triple Bottom Line approach. *Resources, Conservation and Recycling*, *150*, 104448. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104448>
- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, *97*, 76-92. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>
- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2016). Disposition decisions in reverse logistics: Graph theory and matrix approach. *Journal of Cleaner Production*, *137*, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.045>
- Arena, U., Mastellone, M. ., & Perugini, F. (2003). The environmental performance of alternative solid waste management options: a life cycle assessment study. *Chemical Engineering Journal*, *96*(1-3), 207-222. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2003.08.019>
- Assamoi, B., & Lawryshyn, Y. (2012). The environmental comparison of landfilling vs. incineration of MSW accounting for waste diversion. *Waste Management*, *32*(5), 1019-1030. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.023>
- Audenaert, A., De Cleyn, S. H., & Buyle, M. (2012). LCA of low-energy flats using the Eco-indicator 99 method: Impact of insulation materials. *Energy and Buildings*, *47*, 68-73. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.028>
- Badri Ahmadi, H., Kusi-Sarpong, S., & Rezaei, J. (2017). Assessing the social sustainability of supply chains using Best Worst Method. *Resources, Conservation and Recycling*, *126*, 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.020>
- Bal, A., & Satoglu, S. I. (2018). A goal programming model for sustainable reverse logistics operations planning and an application. *Journal of Cleaner Production*, *201*, 1081-1091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.104>
- Bicer, Y., Dincer, I., Zamfirescu, C., Vezina, G., & Raso, F. (2016). Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods. *Journal of Cleaner Production*, *135*, 1379-1395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.023>
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, *233*(2), 299-312. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032>
- Brundtland, G. H. (1989). Global change and our common future. *Environment*, *31*(5), 16-43.

<https://doi.org/10.1080/00139157.1989.9928941>

Camero, C., & Sowlati, T. (2014). Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives - A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 62-73. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.041>

Charnes, A., Cooper, W. W., & Ferguson, R. O. (1955). Optimal Estimation of Executive Compensation by Linear Programming. *Management Science*, 1(2), 138-151. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1.2.138>

Chee Tahir, A., & Darton, R. C. (2010). The Process Analysis Method of selecting indicators to quantify the sustainability performance of a business operation. *Journal of Cleaner Production*, 18(16-17), 1598-1607. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.07.012>

Chileshe, N., Rameezdeen, R., Hosseini, M. R., Martek, I., Li, H. X., & Panjehbashi-Aghdam, P. (2018). Factors driving the implementation of reverse logistics: A quantified model for the construction industry. *Waste Management*, 79, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.013>

Cloquell-Ballester, V. A., Cloquell-Ballester, V. A., Monterde-Díaz, R., & Santamarina-Siurana, M. C. (2006). Indicators validation for the improvement of environmental and social impact quantitative assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 26(1), 79-105. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2005.06.002>

Cohon, J. L., & Marks, D. H. (1975). A review and evaluation of multiobjective programming techniques. *Water Resources Research*, 11(2), 208-220. <https://doi.org/10.1029/WR011i002p00208>

Consonni, S., Giugliano, M., & Grosso, M. (2005). Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste: Part B: Emission and cost estimates. *Waste Management*, 25(2), 137-148. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2004.09.006>

Cuartas Torres, B. A. (2009). Metodología para la optimización de múltiples objetivos basada en ag y uso de preferencias. Escuela de Sistemas. *Universidad Nacional de Colombia*.

Deb, K., Sundar, J., Udaya Bhaskara, R. N., & Chaudhuri, S. (2010). Reference Point Based Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 2(3), 273-286. <https://doi.org/10.5019/j.ijcir.2006.67>

Dehghanian, F., & Mansour, S. (2009). Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(10), 559-570. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2009.04.007>

- Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 594–615. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2013.12.032>
- Dreyer, L. C., Niemann, A. L., & Hauschild, M. Z. (2008). Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(4), 191–200. <https://doi.org/10.1007/bf02978471>
- Dumay, J., Guthrie, J., & Farneti, F. (2010). Gri Sustainability Reporting Guidelines For Public And Third Sector Organizations. *Public Management Review*, 12(4), 531–548. <https://doi.org/10.1080/14719037.2010.496266>
- Dutta, P., Mishra, A., Khandelwal, S., & Katthawala, I. (2019). A multiobjective optimization model for sustainable reverse logistics in Indian E-commerce market. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119348. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119348>
- Ekvall, T., Assefa, G., Björklund, A., Eriksson, O., & Finnveden, G. (2007). What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. *Waste Management*, 27(8), 989–996. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2007.02.015>
- Eslava, J. de J. (2003). Análisis económico-financiero de las decisiones de gestión empresarial. *Esic editorial*.
- Farahani, S., Otieno, W., & Barah, M. (2019). Environmentally friendly disposition decisions for end-of-life electrical and electronic products: The case of computer remanufacture. *Journal of Cleaner Production*, 224, 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.182>
- Feitó-Cespón, M., Sarache, W., Piedra-Jimenez, F., & Cespón-Castro, R. (2017). Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty. A case study. *Journal of Cleaner Production*, 151, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.057>
- Fonseca, M. C., García-Sánchez, Á., Ortega-Mier, M., & Saldanha-da-Gama, F. (2010). A stochastic bi-objective location model for strategic reverse logistics. *Top*, 18(1), 158–184. <https://doi.org/10.1007/s11750-009-0107-2>
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009). Recipe 2008. A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level. *The Hague, Ministry of VROM. ReCiPe*.
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001). The eco-indicator 99: a damage oriented method for life

- cycle impact assessment, Methodology annex. VROM.
- Goedkoop, Mark, & Spriensma, R. (1999). Manual Práctico de Ecodiseño. Operativa de implantación en 7 pasos.
- Goedkoop, Mark, & Spriensma, R. (2000). The eco-indicator99: A damage oriented method for life cycle impact assessment: Methodology report. *Pre Consultants Amersfoort, The Netherlands*, 19-20.
- Goldberg D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Learning*. Optimization, and Machine Learning. Addison Wesley, reading, ma, 1989. *NN Schraudolph and J*, <https://ci.nii.ac.jp/naid/10000038763/>
- González-Torre, P. L., Adenso-Díaz, B., & Artiba, H. (2004). Environmental and reverse logistics policies in European bottling and packaging firms. *International Journal of Production Economics*, 88(1), 95–104. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00181-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00181-6)
- González, B., & Adenso-Díaz, B. (2005). A bill of materials-based approach for end-of-life decision making in design for the environment. *International Journal of Production Research*, 43(10), 2071–2099. <https://doi.org/10.1080/00207540412331333423>
- Govindan, K., Paam, P., & Abtahi, A. R. (2016). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological Indicators*, 67, 753–768. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.017>
- GRI - Global Reporting Initiative. (2006). Sustainability Reporting Guidelines © 2000-2006. *Environment. GRI Amsterdam, The Netherlands*.
- Gu, W., Wang, C., Dai, S., Wei, L., & Chiang, I. R. (2019). Optimal strategies for reverse logistics network construction: A multi-criteria decision method for Chinese iron and steel industry. *Resources Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.02.008>
- Halldórsson, Á., Kotzab, H., & Skjøtt-Larsen, T. (2009). Supply chain management on the crossroad to sustainability: a blessing or a curse? *Logistics Research*, 1(2), 83–94. <https://doi.org/10.1007/s12159-009-0012-y>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Hula, A., Jalali, K., Hamza, K., Skerlos, S. J., & Saitou, K. (2003). Multi-Criteria Decision-Making for Optimization of Product Disassembly under Multiple Situations. *Environmental*

- Science and Technology*, 37(23), 5303–5313. <https://doi.org/10.1021/es0345423>
- Iacovidou, E., Velis, C. A., Purnell, P., Zwirner, O., Brown, A., Hahladakis, J., Williams, P. T. (2017). Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 166, 910–938. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.100>
- ISO. (2010). *ISO/DIS 26000. Guidance on Social Responsibility*.
- Jun, H. B., Cusin, M., Kiritsis, D., & Xirouchakis, P. (2007). A multi-objective evolutionary algorithm for EOL product recovery optimization: Turbocharger case study. *International Journal of Production Research*, 45(18–19), 4573–4594. <https://doi.org/10.1080/00207540701440071>
- Kannan, G., Pokharel, S., & Kumar, P. S. (2009). A hybrid approach using ISM and fuzzy TOPSIS for the selection of reverse logistics provider. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(1), 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.06.004>
- Khor, J. K. S., & Udin, Z. M. (2011). Impact of reverse logistics product disposition towards business performance in Malaysian E&E companies: A conceptual study. *Innovation and Knowledge Management: A Global Competitive Advantage - Proceedings of the 16th International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2011*, 2, 1089–1098. <https://doi.org/10.5171/2012.699469>
- Konak, A., Coit, D. W., & Smith, A. E. (2006). Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering and System Safety*, 91(9), 992–1007. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2005.11.018>
- Krikke, H. R., Van Harten, A., & Schuur, P. C. (1998). On a medium term product recovery and disposal strategy for durable assembly products. *International Journal of Production Research*, 36(1), 111–140. <https://doi.org/10.1080/002075498193967>
- Lebreton, B., & Tuma, A. (2006). !!!A quantitative approach to assessing the profitability of car and truck tire remanufacturing.pdf. *International Journal of Production Economics*, 104(2), 639–652. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527304004372>
- Lee, S. G., Lye, S. W., & Khoo, M. K. (2001). A multi-objective methodology for evaluating product end-of-life options and disassembly. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(2), 148–156. <https://doi.org/10.1007/s001700170086>
- Mangun, D., & Thurston, D. L. (2002). Incorporating component reuse, remanufacture, and recycle into product portfolio design. *IEEE Transactions on Engineering Management*,



- 49(4), 479–490. <https://doi.org/10.1109/TEM.2002.807292>
- Mardle, S., & Miettinen, K. M. (2006). Nonlinear Multiobjective Optimization. *The Journal of the Operational Research Society*, 51(2), 246. <https://doi.org/10.2307/254267>
- Marglin, J. A. (1967). *Public Investment Criteria*. MIT Press. Cambridge,. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315737126>
- Méndez Babey, M. (2008). *Tesis Doctoral Algoritmos Evolutivos y Preferencias del Decisor Aplicados a Problemas de Optimización Multiobjetivo Discretos*. Retrieved from [https://acceda.cris.ulpgc.es/bitstream/10553/3438/1/Tesis\\_589977.pdf](https://acceda.cris.ulpgc.es/bitstream/10553/3438/1/Tesis_589977.pdf)
- Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., & Barbosa-Povoa, A. P. (2015). Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning. *Journal of Cleaner Production*, 105, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.052>
- Nikolaou, I. E., Evangelinos, K. I., & Allan, S. (2013). A reverse logistics social responsibility evaluation framework based on the triple bottom line approach. *Journal of Cleaner Production*, 56, 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.009>
- Olivera, A. (2015). Desarrollo teórico de técnicas meta-heurísticas para resolver problemas de optimización "TN" (Transit Networks) en entornos dinámicos. Retrieved from <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/1979>
- Ortegon, K., Nies, L. F., & Sutherland, J. W. (2013). Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 39, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.022>
- Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., & Rebitzer, G. (2004, July 1). Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.12.009>
- Pishvaei, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 206, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2012.04.010>
- Pushkar, S. (2013). Using Eco-Indicator 99 to Evaluate Building Technologies under Life Cycle Assessment Uncertainties. *Journal of Architectural Engineering*, 20(2), 04013010. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ae.1943-5568.0000143](https://doi.org/10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000143)
- Rajeev, A., Pati, R. K., Padhi, S. S., & Govindan, K. (2017). Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 162, 299–314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.026>

- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2014). Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns. *Omega (United Kingdom)*, 48, 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.11.006>
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., ... Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701–720. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2003.11.005>
- Rubio Lacoba, S. (2003). El sistema de logística inversa en la empresa: análisis y aplicaciones, 299. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=305>
- Sarkis, J., Helms, M. M., & Hervani, A. A. (2010). Reverse logistics and social sustainability. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 17(6), 337–354. <https://doi.org/10.1002/csr.220>
- Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, 54, 1513–1520. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.053>
- Shaharudin, M. R., Govindan, K., Zailani, S., Tan, K. C., & Iranmanesh, M. (2017). Product return management: Linking product returns, closed-loop supply chain activities and the effectiveness of the reverse supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1144–1156. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.133>
- Sheu, J. B., Chou, Y. H., & Hu, C. C. (2005). An integrated logistics operational model for green-supply chain management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(4), 287–313. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2004.07.001>
- Singh, R. K., Rastogi, S., & Aggarwal, M. (2016). Analyzing the factors for implementation of green supply chain management. *Competitiveness Review*, 26(3), 246–264. <https://doi.org/10.1108/CR-06-2015-0045>
- Singh, Rajesh Kumar, & Agrawal, S. (2018). Analyzing disposition strategies in reverse supply chains: fuzzy TOPSIS approach. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 29(3), 427–443. <https://doi.org/10.1108/MEQ-12-2017-0177>
- Smith, R., Poveda, G., Mesa, O., Valencia, D., Dyrer, I., & Jaramillo, P. (2000). *Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre. Universidad Nacional de Colombia* (Vol. 1). Retrieved from [https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=+Decisiones+con+Múltiples+Objetivos+e+Incertidumbre%2C&btnG=](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=+Decisiones+con+Múltiples+Objetivos+e+Incertidumbre%2C&btnG=)

- Staikos, T., & Rahimifard, S. (2007). A decision-making model for waste management in the footwear industry. *International Journal of Production Research*, 45(18–19), 4403–4422. <https://doi.org/10.1080/00207540701450187>
- Taleizadeh, A. A., Haghghi, F., & Niaki, S. T. A. (2019). Modeling and solving a sustainable closed loop supply chain problem with pricing decisions and discounts on returned products. *Journal of Cleaner Production*, 207, 163–181. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.198>
- Tang, C. S., & Zhou, S. (2012). Research advances in environmentally and socially sustainable operations. *European Journal of Operational Research*, 223 (3), 585–594. North-Holland. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.07.030>
- Teunter, R. H. (2006). Determining optimal disassembly and recovery strategies. *Omega*, 34(6), 533–537. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.01.014>
- Vahabzadeh, A. H., Asiaei, A., & Zailani, S. (2015). Green decision-making model in reverse logistics using FUZZY-VIKOR method. *Resources, Conservation and Recycling*, 103, 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.028>
- Wadhwa, S., Madaan, J., & Chan, F. T. S. (2009). Flexible decision modeling of reverse logistics system: A value adding MCDM approach for alternative selection. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(2), 460–469. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2008.01.006>
- Xanthopoulos, A., & Iakovou, E. (2009). On the optimal design of the disassembly and recovery processes. *Waste Management*, 29(5), 1702–1711. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.009>
- Yang, F., Hu, P., Zhao, F., & Hu, C. (2015). Customer returns model in a dual-channel supply chain. *Journal of Modelling in Management*, 10(3), 360–379. <https://doi.org/10.1108/JM2-03-2015-0014>
- Zadeh, L. (1963). Optimality and non-scalar-valued performance criteria. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 8(1), 59–60. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1105511/>
- Zeleny, M. (1973). Compromise Programming, Multiple Criteria Decision Making. *Multiple Criteria Decision Making*. University of South Carolina Press, Columbia, 263–301.
- Ziout, A., Azab, A., & Atwan, M. (2014). A holistic approach for decision on selection of end-of-life products recovery options. *Journal of Cleaner Production*, 65, 497–516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.001>

Zuidwijk, R., & Krikke, H. (2008). Strategic response to EEE returns: Product eco-design or new recovery processes? *European Journal of Operational Research*, 191(3), 1206–1222.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.004>

**PARTE III. DESCRIPCIÓN DEL  
PROBLEMA Y LÍNEAS DE  
ACTUACIÓN**

## **Capítulo 6. Descripción del problema y líneas de actuación**

## 6.1. Introducción

A lo largo de los últimos años, la LI se ha convertido en un elemento diferenciador que permite mejorar el servicio al cliente y el rendimiento de la compañía. Por ello, el flujo inverso de productos ha ido cogiendo mayor protagonismo tanto en el ámbito profesional como académico. Sin embargo, gestionar la LI no es una tarea fácil para las empresas, ya que el PLI tiene asociada una elevada incertidumbre y, generalmente, no se tienen estructuradas ni estandarizadas sus operaciones.

Otros aspectos que dificultan la gestión de la LI son la complejidad y la importancia de la DD, debido a que se tratan grandes cantidades de datos y se necesita una constante actualización de los mismos para tomar dicha decisión. Por ello, para tomar buenas decisiones y lograr unos niveles de eficiencia adecuados, los decisores deben realizar un gran esfuerzo.

Al mismo tiempo, con la idea de transformar el modelo de negocio de las empresas hacia un enfoque más sostenible, interesará que esa toma de decisión eficiente contemple los factores de la sostenibilidad en todo su campo, tal y como se planteó en el apartado 1.2 (Planteamiento del problema y necesidad de la Tesis).

Teniendo en cuenta todos estos aspectos, el Estado del Arte realizado en la Parte II, se ha centrado en aportar información básica y esencial para conocer la LI, en plantear una visión general del PLI y sus decisiones clave y, por último, en el estudio de la DD como decisión más importante dentro del contexto del PLI. De esta forma, el estado del arte ha sido organizado desde la información más general a la más específica.

Tras la realización del EA, se ha puesto de manifiesto que el PLI no está debidamente formalizado, por lo que no siempre se realiza el proceso de la misma manera y no se obtienen los resultados óptimos. Además, se observa la conveniencia de utilizar herramientas matemáticas para la toma de decisiones, especialmente sobre la DD como la más determinante del PLI. Asimismo, se ha comprobado que, de los pocos trabajos existentes para mejorar la toma de decisiones sobre la DD, prácticamente no existen referencias que analicen las decisiones considerando simultáneamente las tres dimensiones de la sostenibilidad.

A pesar de que la literatura revisada confirma la utilidad y conveniencia de formalizar el PLI y de disponer de herramientas matemáticas que permitan una DD eficiente y

sostenible, no se han encontrado modelos, metodologías, marcos de referencia o herramientas en general para la definición y adaptación de modelos del PLI y matemáticos integrados que sean capaces de abarcar el problema en su conjunto.

En el presente capítulo, se describe detalladamente el problema para conocer todo su alcance, desglosándolo en tres grandes apartados: falta de formalización del PLI, problemas de eficiencia y falta de visión integral de sostenibilidad con respecto a la DD. Posteriormente, en la sección 6.3 se plantea una propuesta de solución integrada, **combinando el modelado matemático con el modelado de proceso**. Finalmente, en la sección 6.4 se muestran las conclusiones del presente capítulo.

## 6.2. Descripción del problema

Durante los últimos años, el incremento en el número de devoluciones y la presión por el aprovechamiento del valor de los productos recuperados ha aumentado el protagonismo de las operaciones de LI en la gestión cotidiana de la empresa.

Una buena gestión de la LI facilita a la empresa alcanzar altos niveles de competitividad, mejorar el nivel de servicio al cliente y controlar de manera más eficiente los costes. Sin embargo, la gestión de la LI no resulta fácil porque está caracterizada por una fuerte incertidumbre respecto a los siguientes aspectos:

- Momento en el que se va a producir la devolución del producto (cuándo)
- Cantidad de productos a recuperar y tratar (cuánto)
- Estado en el que se encuentra cada producto (cómo)

Estos aspectos de incertidumbre influyen directamente sobre la elección del tratamiento que se le dará al producto y, por lo tanto, sobre el impacto que la devolución o la recuperación tendrá sobre el sistema.

La gestión de la LI se complica aún más cuando las empresas no le dan la importancia que se merece, dejándola en segundo plano, y sin tener claro ni consensuado cómo actuar frente a los casos de productos devueltos o recuperados. La falta de coordinación y conexión entre las áreas de la compañía, implicadas en las operaciones de LI, dificulta la visión completa del PLI como un proceso transversal que afecta a toda la empresa.

En muchas ocasiones, existe una falta de consenso respecto a la forma de tratar la LI y afrontar sus decisiones, especialmente la DD, de manera que se deja a propio criterio del



decisor escoger el tratamiento que se le dará al producto, o bien se escoge siempre el mismo tratamiento (política fija), sin llegar a valorar todas las alternativas de disposición posibles. La problemática de la DD se agrava cuando no se dispone del tiempo suficiente para analizar bien las distintas opciones de la DD, a veces porque el decisor se encuentra frente al cliente y este requiere una respuesta inmediata.

El hecho de no valorar correctamente todas las posibles alternativas de disposición provoca que no se escoja siempre la mejor alternativa. Adoptar una mala DD puede acarrear muy malas consecuencias a la empresa: desaprovechamiento del valor del producto, pérdidas económicas, incumplimiento de la ley, mala imagen de la empresa, empeoramiento de la relación con el cliente. Si el tratamiento escogido no es el más adecuado, a parte de la empresa, el medio ambiente y la sociedad pueden verse afectados negativamente.

La DD puede parecer obvia y sencilla de tomar, pues en base a las directrices marcadas por las leyes medioambientales y conociendo la rentabilidad económica relacionada con cada alternativa de disposición, **la alternativa preferente de disposición, en todos los casos, será revender o reutilizar el producto**, directamente y cuánto antes mejor. Mediante esta alternativa, se puede obtener el mayor ingreso posible y los mínimos costes de transporte, tratamiento y almacenamiento, entre otros. Todo ello, sin generar ningún tipo de residuo. Pero en muchas ocasiones, no se podrá revender o reutilizar el producto directamente porque no estará en perfecto estado.

Justo en el momento en que se determina que el producto no puede ser reutilizado o no puede seguir funcionando perfectamente en su estado actual, habrá que plantearse, por un lado, rebajar las expectativas de ingresos económicos y reintroducir el producto a través de **un mercado secundario, sin intervenir sobre él** o, por otro lado, **intervenir sobre él** para poder sacarlo como nuevo al mercado sin rebajar el nivel de ingresos.

Esta situación se puede apreciar en muchos tipos de productos como, por ejemplo, en los sillones de relax, los cuales pueden regresar a la empresa, tras una exposición o una feria, y no estar en perfecto estado. En estos casos, la empresa se plantea la opción de reintroducirlo en el mercado a través de un *outlet*, con un precio inferior, o intervenir sobre él para reintroducirlo en el mercado a su precio original. Esta última disposición, aporta **referencias positivas** con respecto a la alternativa del mercado *outlet*, ya que ofrece un ingreso superior y socialmente puede crear empleos. Por el contrario, se generan

**referencias negativas** en forma de crecimiento del impacto ambiental y mayores gastos para la empresa por la intervención sobre el producto.

En este caso, la elección de la mejor disposición ya no es tan obvia, debido a que aspectos como el estado en el que se encuentra el sillón, el grado de intervención necesario o la demanda del sillón en un mercado, entre otros, harán que sea más viable una alternativa u otra.

Al mismo tiempo, cabe considerar que un producto puede contener varios componentes que pueden aportar cierto valor a la empresa de manera independiente, según la disposición que se les determine, por lo que puede resultar más interesante tratar los componentes por separado que el producto en su conjunto. Esta circunstancia se puede apreciar en los neumáticos usados, por ejemplo, donde es posible que sea más interesante descomponer el neumático (valorizarlo) para aprovechar componentes como el alambre, la fibra y el caucho en vez de revender el producto en un mercado secundario o recauchutarlo para sacarlo de nuevo al mercado.

Además, la decisión sobre la mejor disposición ha estado marcada, tradicionalmente, por el criterio económico. Durante esta última década, y tras el endurecimiento de las leyes medioambientales, la **perspectiva ambiental** ha pasado a ser también un criterio clave en dicha decisión. Actualmente, hay un potencial significativo para que las herramientas de ingeniería desarrolladas para mejorar la eficiencia se reorienten hacia el desarrollo sostenible (Bandyopadhyay *et al.*, 2017).

Por tanto, siendo coherente con dicha afirmación y siguiendo la tendencia actual de trabajo, los **aspectos que influyen en la toma de decisiones sobre la alternativa de tratamiento deberían centrarse en el triple enfoque de la sostenibilidad: económico, ambiental y social** (Ziout *et al.*, 2014).

Consecuentemente, no conocer algunos datos relativos al PLI, o no tenerlos actualizados, comporta que se desconozca si la decisión tomada es la mejor.

Después de toda la literatura revisada, no se han encontrado ni modelos ni marcos ni metodologías para el desarrollo de modelos combinados con modelado de procesos y modelado matemático que, además, sean aplicados a casos concretos. Por ello, resulta esencial definir un marco de trabajo que permita formalizar y estructurar la DD en el

ámbito de la LI para ayudar a la toma de decisiones de manera que sea lo más eficiente y sostenible posible.

Por todo ello, los problemas a resolver son:

- 1. No tomar la DD siempre de la misma manera.** En gran número de ocasiones, no se tiene claro ni consensuado cómo actuar frente a los casos de LI, derivando la decisión sobre el propio decisor.
- 2. No tener una visión completa del PLI.** La falta de coordinación y conexión entre las diferentes áreas de la compañía, implicadas en las operaciones de LI, dificulta la visión completa del PLI como un proceso transversal que afecta a toda la empresa.
- 3. Tomar decisiones que no siempre están alineadas con la estrategia de la empresa.** Escoger la disposición del producto en base a un criterio concreto que no vaya alineado con la estrategia de la empresa, puede provocar falta de credibilidad y desconfianza por parte de los clientes.
- 4. Tomar la decisión sin analizar el resto de las alternativas posibles y, por lo tanto, sin saber cuál es la mejor alternativa.** Tomar la decisión sobre la disposición del producto en base a una política fija de decisiones, provoca el desconocimiento sobre si la decisión tomada es la más acertada en cada caso.
- 5. Necesidad de tomar una decisión rápida y sin posibilidad de modificación.** En muchas ocasiones, no se dispone de mucho tiempo para tomar la DD, especialmente cuando el decisor se encuentra “frente” al cliente y requiere una respuesta inmediata. Esto puede provocar que las prisas por dar una respuesta al cliente y no hacerle esperar, haga que no se puedan valorar de manera correcta todas las posibles alternativas de disposición.
- 6. Tomar una DD inadecuada puede causar graves problemas a la empresa, al medio ambiente y a la sociedad.** Elegir una disposición inadecuada, desde el punto de la sostenibilidad, puede suponer el desaprovechamiento del valor del producto por parte de la empresa, pérdidas económicas, incumplimiento de la ley, mala imagen de la empresa, empeoramiento de la relación con el cliente, mayor impacto ambiental y un impacto social negativo.

- 7. Contemplar únicamente el aspecto económico para decidir sobre la disposición de los productos.** No contemplar aspectos ambientales y sociales, junto al aspecto económico, impide que la decisión sea realmente sostenible, dificultado el cambio de modelo de negocio de las empresas hacia modelos más sostenibles y acordes con los tiempos actuales.

Toda la problemática expuesta se puede resumir, caracterizar y agrupar en tres grandes apartados de problemas, tal y como se expone a continuación:

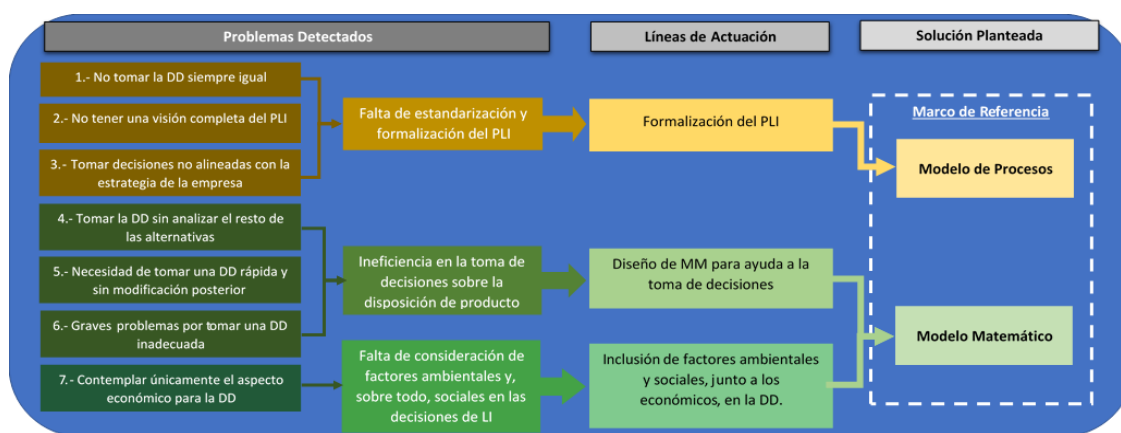
- **Falta de formalización del PLI**, por lo que es difícil tener una referencia clara y global de cómo se deben hacer las cosas (Problemas 1, 2 y 3):
  - **Problema 1. No tomar la DD siempre de la misma manera.**
  - **Problema 2. No tener una visión completa del PLI.**
  - **Problema 3. Tomar decisiones que no siempre están alineadas con la estrategia de la empresa**
- **La DD, como decisión importante y compleja dentro del PLI, no se toma de manera ágil y eficiente;** por lo que no se contemplan todas las alternativas posibles, ni se tiene en cuenta la información detallada y actualizada de todo lo que rodea al PLI y, más concretamente, a la DD (Problema 4, 5 y 6):
  - **Problema 4. Tomar la decisión sin analizar el resto de las alternativas posibles y, por lo tanto, sin saber cuál es la mejor alternativa.**
  - **Problema 5. Necesidad de tomar una decisión rápida y sin posibilidad de modificación.**
  - **Problema 6. Tomar una DD inadecuada puede causar graves problemas a la empresa, al medio ambiente y a la sociedad.**
- **La DD no se toma en base al enfoque íntegro de sostenibilidad,** por lo que dificulta el cambio de modelo de negocio hacia una visión más sostenible (Problema 7):
  - **Problema 7: Contemplar únicamente el aspecto económico para decidir sobre la disposición de los productos.**

### 6.3.Líneas de actuación

Los problemas expuestos en el apartado anterior se abordarán mediante el desarrollo de un Marco de Referencia que los tratará de resolver de la siguiente manera:

- En primer lugar, los problemas referentes a la falta de formalización del PLI se abordarán mediante la inclusión de la perspectiva de **modelado de procesos de negocio en el Marco de Referencia**. El modelado de procesos estructura las operaciones que componen el PLI en formato gráfico o de diagrama de procesos, mostrando la secuencia de las operaciones a realizar.
- En segundo lugar, los problemas relacionados con la mejora de la eficiencia y agilidad en la DD, así como la necesidad del enfoque de sostenibilidad, se resolverán mediante la inclusión de la perspectiva de **modelado matemático en el Marco de Referencia**. El modelado matemático permite trabajar con gran cantidad de parámetros para dotar de una solución óptima en función de unos objetivos preestablecidos. Además, se pueden incluir objetivos económicos, ambientales y sociales para que la decisión contemple la triple dimensión de la sostenibilidad.
- En tercer lugar, el Marco de Referencia contendrá una solución que combine ambos tipos de modelado (matemático y de procesos) para afrontar toda la problemática en su conjunto.

A continuación, se presenta una figura (Figura 18) que muestra la relación entre los problemas detectados, las líneas de actuación definidas y la solución que se pretende plantear:



**Figura 18.**Relación entre los problemas detectados, las líneas de actuación y la solución planteada  
 (Elaboración Propia)

De esta forma, la solución que se desarrollará a continuación pretende cubrir las siguientes **funcionalidades** o requerimientos:

- a) Dar soporte a la definición del PLI en situaciones, tanto de diseño o creación, como rediseño o modificación de dicho proceso.
- b) Proporcionar la visión completa del PLI y la integración de la DD en dicho proceso.
- c) Ofrecer un conjunto completo de alternativas de disposición para los productos devueltos o recuperados.
- d) Suministrar un marco genérico de los principales aspectos económicos, ambientales y sociales a considerar en cada alternativa de disposición que sirvan como base para la definición de los parámetros del modelo matemático.
- e) Abarcar, de manera conjunta, toda la problemática detectada con respecto al PLI.
- f) Indicar las pautas necesarias para la adaptación del PLI y del modelo matemático a cada caso particular.
- g) Aportar una serie de pasos concretos y detallados para poder aplicar con éxito el Marco de Referencia a una empresa determinada.
- h) Dar al cliente una respuesta rápida, eficiente y sostenible que sea adaptable a cada situación concreta.

La solución planteada para hacer frente a toda la problemática estará compuesta por un Marco de Referencia que combinará el modelado de procesos y el modelado matemático. En primer lugar, se utilizará el **modelado de procesos** para hacer frente a la formalización y estandarización del PLI (primer gran apartado de problemas). En segundo lugar, se utilizará el **modelado matemático** para la mejora de la eficiencia y la sostenibilidad en la DD (segundo y tercer gran apartado de problemas). Finalmente, se **integrará ambos tipos de modelado** con la intención de abordar toda la problemática en su conjunto.

A continuación, se describe con mayor detalle la solución planteada:

- **Modelado de procesos:** Aprovechando toda la información expuesta respecto al PLI, en el Capítulo 4 (etapas principales que lo componen, posibles eventos que dan inicio

al proceso, diferentes alternativas de disposición y decisiones clave en el ámbito de la LI) se pretende estudiar a fondo y definir un PLI genérico que abarque todas las situaciones posibles de LI. Se utilizará el modelado de procesos porque facilita el entendimiento de los procesos de negocio, permitiendo apreciar, a través de la representación gráfica, la conexión entre las acciones y las decisiones a tomar a lo largo del mismo. A través del modelado del PLI se pretende ayudar a tomar siempre la decisión sobre la disposición de los productos de la misma manera, al tiempo que se ofrecerá una visión completa del proceso.

- **Modelado matemático:** La línea de trabajo centrada en la mejora de la eficiencia y sostenibilidad con respecto a la DD consistirá en diseñar una herramienta matemática que ayude en la toma de decisiones. La gran variedad de parámetros que influyen en la decisión y la necesidad de dar una respuesta rápida sitúa al modelado matemático como herramienta ideal a la hora de abordar este tipo de decisiones. Además, la necesidad de tomar la decisión en base a la dimensión económica, ambiental y social, fuerza que el modelado matemático sea complementado con la optimización multi-objetivo. De esta forma, la herramienta matemática propuesta estará formada, en primer lugar, por un modelo matemático que servirá para encontrar las mejores disposiciones desde una perspectiva económica, ambiental y social. En segundo lugar, estará compuesta por un proceso de solución multi-objetivo que determine la mejor alternativa de disposición.
- **Modelado integrado.** Si bien los problemas identificados y explicados se podrían abordar por separado o de manera aislada, **la verdadera aportación de esta tesis es precisamente plantear una solución integrada para todos ellos**, de manera que se pueda abordar el desarrollo de una herramienta matemática de ayuda a la toma de decisiones, basada en el modelado matemático, y combinada con el modelado de procesos. En este sentido, para un desarrollo adecuado de modelos matemáticos como herramientas de ayuda a la toma de decisiones del PLI, se considera imprescindible conocer previamente las actividades que integran dicho proceso, especialmente aquellas de carácter decisional ya que, precisamente para estas será necesario desarrollar modelos que ayuden a una mejor toma de decisiones (Alarcón *et al.*, 2007, 2009). Además de conocer el proceso en general y sus decisiones clave, es fundamental identificar la información necesaria para adoptar la decisión de la manera más eficiente y sostenible posible.

La solución integrada propuesta se expondrá como Marco de Referencia en la siguiente parte de la tesis. Dicho marco reúne, estructura y facilita el entendimiento de los distintos aspectos que el modelador debe tener en cuenta al construir una herramienta matemática de ayuda a la toma de decisiones en el PLI. De esta forma, el modelo matemático obtenido, componente fundamental de dicha herramienta, se habrá elaborado a partir del conocimiento de la realidad a modelar, organizado desde una perspectiva de modelado de procesos de negocio. El MR se presentará en el Capítulo 7 en forma de propuesta general de solución sobre los problemas de LI.

En el Capítulo 8, se detallará la propuesta del PLI en base al modelado de procesos de negocio. El contenido de la herramienta matemática y el funcionamiento de sus componentes (modelo matemático y proceso de solución) se desarrollará entre los capítulos 9 y 11 de la presente tesis.

En el Capítulo 12 se mostrará la combinación de ambos tipos de modelado (matemático y de procesos) de manera que se integra el proceso de solución de la herramienta matemática como un subproceso del PLI genérico.

Para poder resolver el problema planteado inicialmente en el mayor número de situaciones posibles, el Marco de Referencia permitirá adaptar los modelos genéricos presentados hasta el momento en modelos particulares. Precisamente, en el capítulo 13 se expondrá una metodología que guíe al usuario en este proceso de adaptación.

Finalmente, los capítulos 14 y 15 contendrán dos ejemplos de aplicación del Marco de Referencia que permitirán apreciar el funcionamiento de la metodología de adaptación del modelo genérico integrado a dos casos particulares y los resultados obtenidos.

## **6.4. Conclusiones**

La problemática descrita en el presente capítulo se ha organizado alrededor de tres grandes apartados: la formalización del PLI, la toma de decisiones ágil y eficiente y la visión sostenible en la consideración sobre la disposición a tomar. A partir de los problemas identificados, se han definido las **funcionalidades** que debería tener la herramienta a desarrollar.



Se ha planteado solucionar el problema en su conjunto **mediante el desarrollo de un Marco de Referencia que aporte una solución integrada, de manera que pueda combinar el modelado de procesos de negocio con el modelado matemático.**

El modelado de procesos de negocio, centrado en el apartado de formalización del PLI, estructura las operaciones que lo componen en forma de diagrama de proceso. Asimismo, para conseguir una toma de decisiones ágil, eficiente y sostenible, se ha planteado una herramienta matemática, compuesta fundamentalmente de un modelo matemático y de un proceso de solución, que permita abordar la decisión desde un enfoque multidimensional.

En el siguiente apartado, tratando de afrontar toda la problemática en su conjunto y que todo quede relacionado, se presenta el Marco de Referencia para la integración de ambos tipos de modelado mediante una metodología de adaptación de modelos genéricos a modelos concretos, todo lo cual constituye la principal aportación de esta tesis.

## **6.5. Referencias**

- Alarcón, F., Lario, F. C., Boza, A., & Perez, D. (2007). Propuesta de Marco Conceptual para el Modelado del Proceso de Planificación Colaborativa de una Red de Suministro/Distribución (RdS/D). *Visión Informacional. Congreso de Ingeniería de Organización*, 0873–0882.
- Alarcón, F. *et al.* (2009). Modelo conceptual para el desarrollo de modelos matemáticos de ayuda a la toma de decisiones en el proceso colaborativo de comprometer pedidos. *3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XIII Congreso de Ingeniería de Organización*, 3–12.

## **PARTE IV. PROPUESTA**

# **Capítulo 7. Propuesta de Marco de Referencia**

## **7.1.Introducción**

Tras la revisión bibliográfica realizada en el estado del arte, una de las conclusiones que se ha extraído es que existe una necesidad de formalización de los PLI, para conseguir mejorar la gestión de la LI y obtener mayor eficiencia y rentabilidad.

Otra conclusión es que se ha destacado la DD de entre todas las decisiones clave del PLI por su importancia y trascendencia sobre el resto del proceso. Al ser una decisión tan compleja y determinante, se ha apuntado la necesidad de desarrollar herramientas de ayuda a la toma de decisiones, con la finalidad de conseguir escoger la mejor alternativa de disposición en cada caso concreto, de una manera ágil y eficiente. Además, ante la necesidad de transformación hacia modelos más sostenibles, se ha manifestado la conveniencia de considerar las tres dimensiones de la sostenibilidad en la DD.

A parte de estas conclusiones, también se ha destacado la importancia de contar con una solución integral para abarcar toda la problemática expuesta, sin embargo, no se ha encontrado en la literatura revisada ningún marco de trabajo que abarque el problema en su conjunto y que permita la adaptación del PLI a cada caso concreto. Por ello, el objetivo del presente capítulo es proponer un Marco de Referencia para el Desarrollo Integrado de Modelos de Procesos y Matemáticos en un contexto de LI (MR-DIMPM-LI).

El presente capítulo se estructura de la siguiente manera. En la sección 7.2, se explica el Marco de Referencia propuesto, de manera que, inicialmente, se exponen las necesidades que pretende cubrir y los bloques que componen el Marco de Referencia, así como la relación entre los bloques y dichas necesidades. Finalmente, se detallan los distintos bloques que componen el MR-DIMPM-LI y los pasos a seguir para poder aplicarlo. En la sección 7.3, se ofrecen las principales conclusiones a las que se llega en el presente capítulo.

## **7.2.Marco de Referencia propuesto (MR-DIMPM-LI)**

En la presente tesis se propone un Marco de Referencia que combina el modelado de procesos con el modelado matemático para abordar toda la problemática, comentada anteriormente, relacionada con el PLI y la DD. Al mismo tiempo, se pretende que el MR-DIMPM-LI facilite la adaptación del PLI a situaciones concretas.

La combinación de ambos tipos de modelado es interesante porque el modelado de procesos sirve para formalizar el proceso y, al mismo tiempo, ayuda a construir el MM de una manera más ordenada, formal, consensuada e incluso más estructurada, aportando todas las alternativas de disposición a considerar y todos los factores que pueden influir sobre cada una de ellas (Alarcón *et al.*, 2009).

En esta línea de trabajo, a continuación, se exponen las partes a desarrollar dentro del marco para poder cubrir las funcionalidades comentadas anteriormente (Aparatado 6.3):

FUNCIONALIDADES	PARTES A DESARROLLAR EN EL "MR-DIMPM-LI"
a) Dar soporte a la definición del PLI	<b>Modelo genérico del PLI</b> que ofrezca una visión completa del mismo
b) Mostrar una visión integral del PLI	<b>Modelo genérico del PLI</b> con la integración de la DD como decisión clave
c) Ofrecer un conjunto completo de alternativas de disposición	<b>Herramienta matemática genérica</b> que contenga las alternativas de disposición como variables de decisión
d) Suministrar aspectos económicos, ambientales y sociales de cada alternativa	<b>Herramienta matemática genérica</b> que contenga los aspectos económicos, ambientales y sociales como parámetros de cada alternativa
e) Afrontar toda la problemática general del PLI	<b>Modelo genérico integrado</b> relacionando el PLI con la herramienta matemática conectando ambos tipos de modelado y compartiendo información
f) Adaptar el PLI y el modelo matemático a cada caso concreto	<b>Metodología de adaptación</b> de los modelos genéricos de procesos y matemáticos a casos concretos
g) Aportar los pasos concretos para aplicar el Marco de Referencia	<b>Metodología de adaptación</b> de los modelos genéricos y su adaptación a casos concretos
h) Ofrecer al cliente una respuesta rápida, eficiente y sostenible	<b>Modelo particular integrado</b> que calcule rápidamente soluciones ante cada caso concreto o cada llamada de clientes

**Tabla 9.** Relaciones entre las funcionalidades del Marco de Referencia y las partes a desarrollar (Elaboración propia).

A partir de la identificación de las funcionalidades propias del marco y las partes a desarrollar, se especifican los bloques básicos del Marco de Referencia que se consideran necesarios para realizar dichas funcionalidades y cubrir las partes a desarrollar.

- **BLOQUE I: Modelo genérico del PLI.** Bloque que recoge un modelo genérico del PLI ofreciendo una visión completa del proceso, desde un enfoque de modelado de procesos de negocio. Dicho bloque contempla la DD

como eje central del PLI, mostrando todas las posibles alternativas de disposición, ayudando así en la formalización del PLI y en la estandarización de las actividades que componen el proceso.

- **BLOQUE II: Herramienta Matemática Genérica.** Bloque que incluye la herramienta matemática genérica de ayuda a la toma de decisiones, compuesta por el modelo matemático y el proceso de solución multiobjetivo. A través del MM se obtienen las mejores soluciones para cada dimensión de la sostenibilidad y gracias al proceso de solución se establece cómo obtener la mejor alternativa de disposición.
- **BLOQUE III: Modelo genérico integrado, compuesto por el modelo genérico del PLI con el subproceso de solución incluido, y el modelo matemático genérico.** Bloque que combina el modelo genérico del PLI (Bloque I) y la herramienta matemática genérica (Bloque II), integrando el proceso de solución de la herramienta matemática como un subproceso del modelo del PLI. A partir de este bloque, se ofrece una visión integrada del MR-DIMPM-LI.
- **BLOQUE IV: Modelo particular integrado, compuesto por el modelo particular del PLI con el subproceso de solución incluido, y el modelo matemático particular.** Bloque que representa la adaptación del modelo general a un caso particular, tanto el modelo genérico del PLI con el subproceso de solución, como el modelo matemático genérico. De esta forma, los modelos diseñados para la ayuda en la toma de decisiones se adecúan en base a la descripción de cada caso concreto, dando la posibilidad de formalizar cada PLI concreto y ofrecer una toma de decisiones eficiente y sostenible para cada situación.

De esta forma, los BLOQUES planteados se corresponderían con las funcionalidades y las partes necesarias de la siguiente forma:

FUNCIONALIDADES	PARTES A DESARROLLAR EN EL "MR-DIMPM-LI"	BLOQUE
a) Dar soporte a la definición del PLI	Modelo genérico del PLI que ofrezca una visión completa del mismo	BLOQUE I

b) Mostrar una visión integral del PLI	Modelo genérico del PLI con la integración de la DD como decisión clave	
c) Ofrecer un conjunto completo de alternativas de disposición	Herramienta matemática genérica que contenga las alternativas de disposición como variables de decisión	BLOQUE II
d) Suministrar aspectos económicos, ambientales y sociales de cada alternativa	Herramienta matemática genérica que contenga los aspectos económicos, ambientales y sociales como parámetros de cada alternativa	
e) Afrontar toda la problemática general del PLI	Modelo genérico integrado relacionando el PLI con la herramienta matemática conectando ambos tipos de modelado y compartiendo información	BLOQUE III
f) Adaptar el PLI y el modelo matemático a cada caso concreto	Metodología de adaptación de los modelos genéricos de procesos y matemáticos a casos concretos	BLOQUE IV
g) Aportar los pasos concretos para aplicar el Marco de Referencia	Metodología de adaptación de los modelos genéricos y su adaptación a casos concretos	
h) Ofrecer al cliente una respuesta rápida, eficiente y sostenible	Modelo particular integrado que calcule rápidamente soluciones ante cada caso concreto o cada llamada de clientes	

Tabla 10. Relaciones entre las funcionalidades, las partes a desarrollar y los bloques del Marco de Referencia (Elaboración propia).

En la figura siguiente (Figura 19) se muestra gráficamente el MR-DIMPM-LI propuesto, con sus bloques y relaciones, que se explicarán detalladamente a continuación:

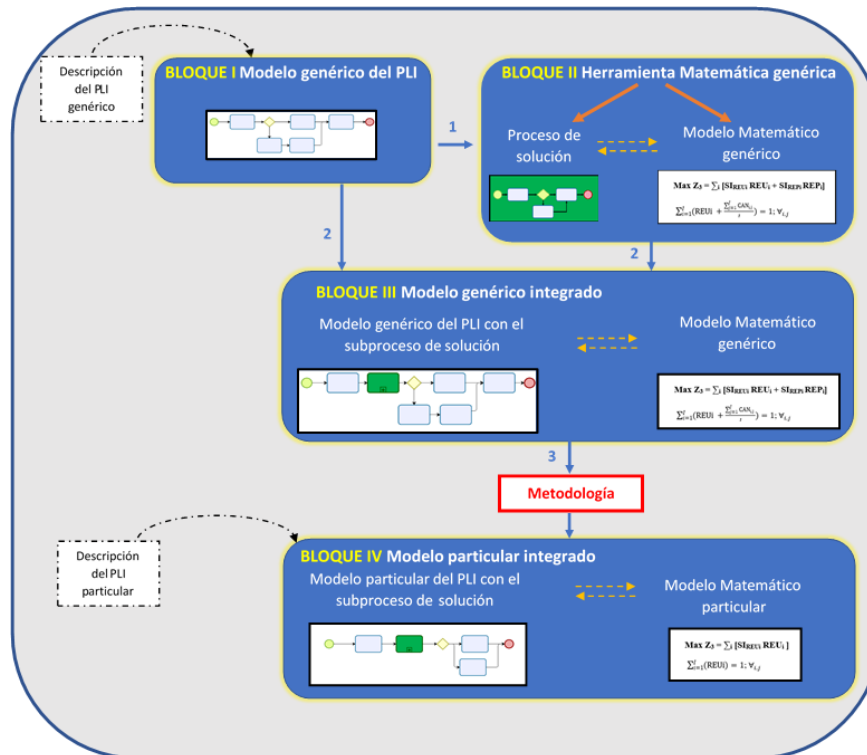
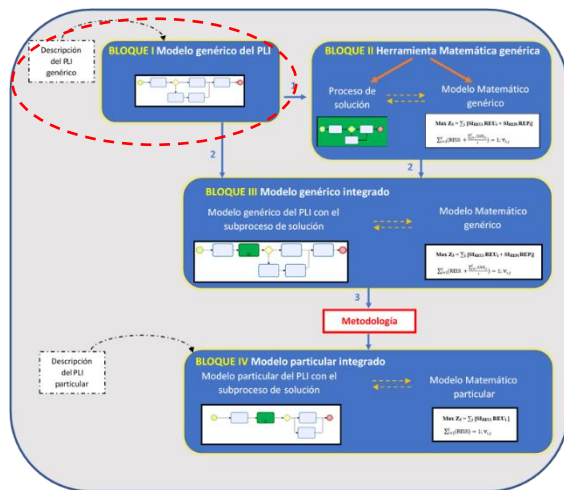


Figura 19. Marco de Referencia propuesto (Elaboración Propia)

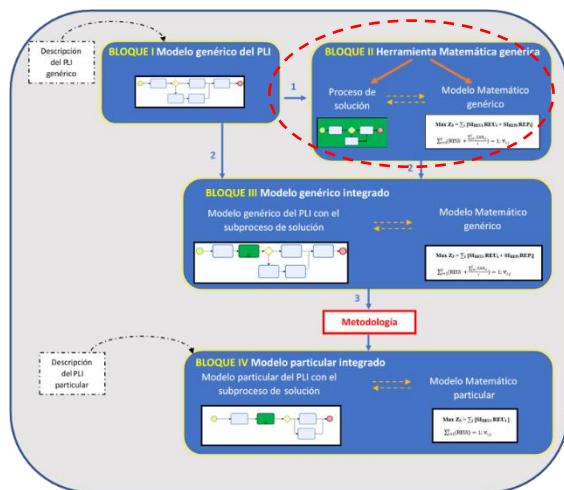
El BLOQUE I contiene un modelo genérico del PLI construido a partir de la descripción



general del proceso. Este modelo genérico pretende representar el funcionamiento de un proceso estándar de LI que pudiera tener lugar en cualquier CdS. En este proceso estándar se recogen todas las posibles alternativas de disposición, siendo la principal decisión del proceso la DD.

El PASO 1 en la aplicación del MR-DIMPM-LI, representado en la (Figura 19)

como la flecha numerada con 1 que une el Bloque I y el Bloque II, representa la obtención de la herramienta matemática genérica (BLOQUE II) basándose en la información esencial sobre las posibles alternativas de tratamiento que se ofrece en el modelo genérico del PLI (BLOQUE I).



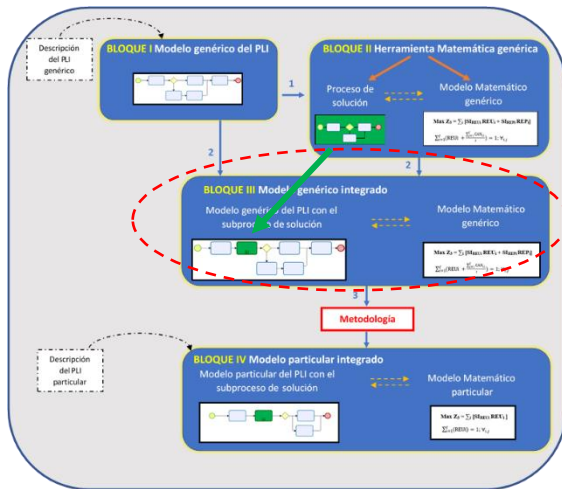
A partir del conocimiento de todas las alternativas disponibles y sus características esenciales que determinan la conveniencia de una u otra, se definen todos y cada uno de los parámetros económicos, ambientales y sociales a considerar en cada alternativa de disposición para desarrollar el modelo matemático.

Asimismo, también se define desde el modelo genérico del PLI, la exclusividad de un solo tratamiento para el producto o para cada uno de sus componentes.

Con la definición del MM genérico, y para atender la necesidad de desarrollo de una solución multi-objetivo, se incorpora también el proceso de solución que se necesitaría seguir con el MM para obtener la alternativa más adecuada.



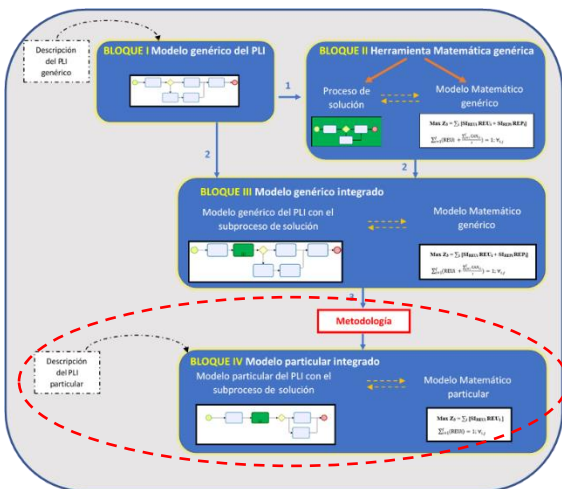
Una vez diseñado el modelo del PLI y la herramienta matemática, desde una perspectiva genérica, se combinan ambos tipos de modelado para plantear una solución integrada,



mediante el **PASO 2**, dando lugar así al BLOQUE III, tal y como se aprecia en la Figura 19. En este sentido, el proceso de solución diseñado en la herramienta matemática es integrado como subproceso (flecha verde en la imagen adjunta) dentro del PLI, consiguiendo así abordar el problema planteado en su totalidad.

Tras la obtención del modelo genérico integrado, se plantea la adaptación a un modelo particular, adaptando el modelo de PLI (con el subproceso de solución integrado) y el modelo matemático a un caso concreto. Para ello, a través de la descripción detallada del PLI particular y siguiendo los pasos de una **metodología** diseñada para tal efecto, se adaptarán ambos modelos genéricos al caso

concreto (**PASO 3**).



La adaptación de los modelos genéricos a los modelos particulares vendrá determinada principalmente por las alternativas de disposición disponibles y sus correspondientes parámetros de influencia, en cada caso particular, obteniendo así el BLOQUE IV.

El MR-DIMP-LI propuesto trata de recoger y estructurar los aspectos necesarios para el desarrollo de modelos integrados del PLI con herramientas de ayuda a la toma de la DD del producto en una serie de bloques que se pueden ordenar, a su vez, alrededor de tres dimensiones o ejes principales:

- **Un eje vertical que determina el tipo de modelado** (color gris en la Figura 20) divide el Marco de Referencia en dos partes. A la izquierda, muestra la visión de procesos de negocio, donde se incluyen los distintos modelos del PLI y de solución. En la parte de la derecha, se sitúan los modelos matemáticos.

- **Un eje que determina el nivel de integración de los modelos de procesos con los modelos matemáticos** (color naranja en la Figura 20) . Este eje divide al Marco de Referencia horizontalmente en dos zonas. La parte superior corresponde a la visión no integrada, donde se presentan los modelos genéricos de referencia de procesos y matemático por separado. En la parte inferior, se aprecia el modelo del PLI con el subproceso de solución integrado y combinado con el modelo matemático correspondiente.
- **Un eje que separa los bloques en función del tipo de enfoque, general o particular, que se utiliza en sus contenidos** (color verde en la Figura 20) . Este eje divide horizontalmente al marco en dos partes: en la parte superior están los contenidos genéricos de los modelos de proceso y matemáticos, mientras que en la parte inferior se hace referencia a los modelos particulares del marco que representarían los modelos adaptados a casos concretos de CdS.

Estos tres ejes se podrían representar gráficamente de la siguiente manera (Figura 20):

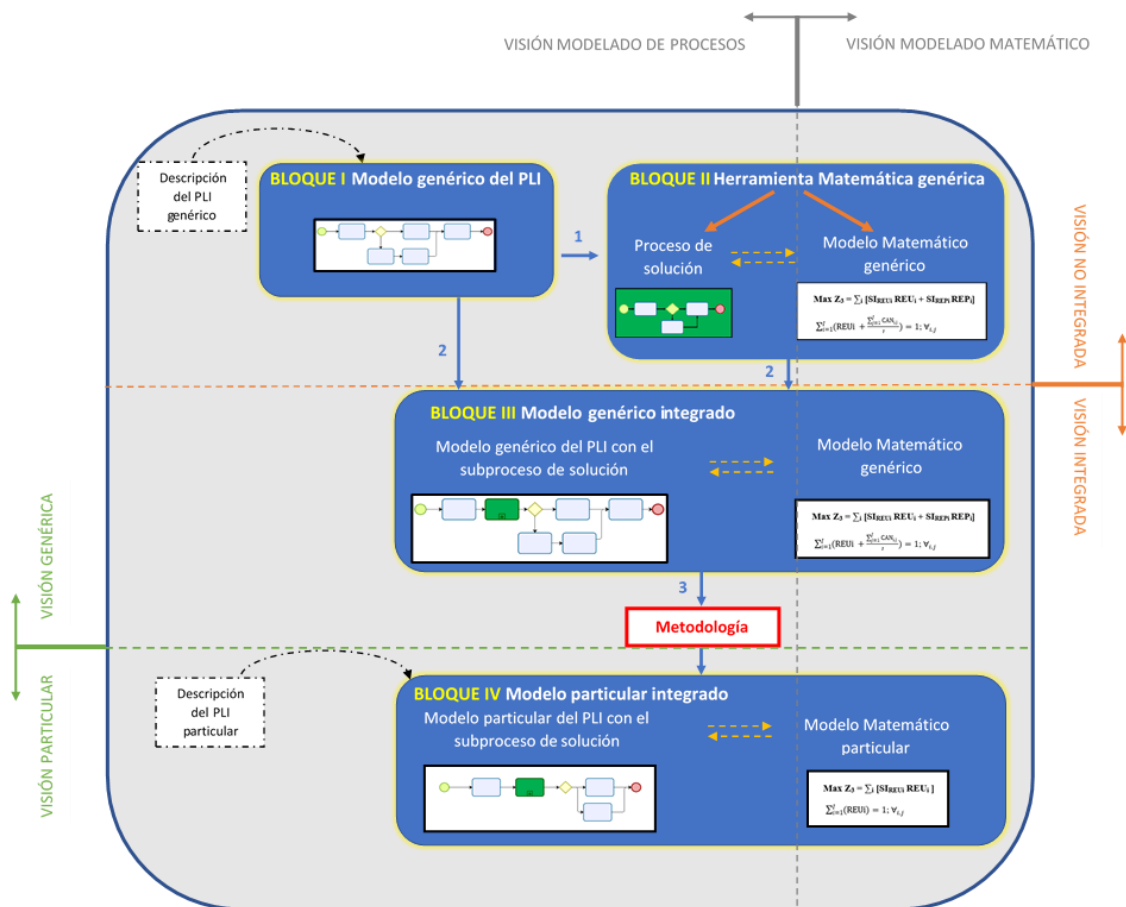


Figura 20. Marco de Referencia propuesto con ejes de estructuración (Elaboración Propia)

### 7.3. Conclusiones

El Marco de Referencia propuesto se ha diseñado pensando en satisfacer las siguientes necesidades detectadas: **ayudar a formalizar el proceso de LI, dar soporte al decisor respecto a la DD de manera que se pueda tomar con las mayores garantías y eficiencia, proporcionar los parámetros necesarios para poder tomar la DD en base criterios de sostenibilidad y facilitar la adaptabilidad a cada caso particular.**

Una de las aportaciones importantes del Marco de Referencia presentado es la de abordar el desarrollo de un modelo matemático como herramienta de ayuda a la toma de decisiones, desde una perspectiva de procesos de negocio, combinando así dos áreas complementarias, aunque tradicionalmente aisladas: la de modelado matemático y la de modelado de procesos de negocio. De esta manera, se fuerza al propio modelador a considerar primero el proceso de negocio a la hora de desarrollar el modelo, obteniendo así una mejora en la calidad del MM obtenido y una mejora en la eficiencia de las operaciones.

Otra aportación importante que ofrece el Marco de Referencia está en la capacidad de adaptación de una visión genérica, válida para todos los casos de LI, a una visión particular. De esta forma, la adaptación del Marco de Referencia para cada caso concreto puede ejecutarse sin problemas, facilitando la formalización del proceso y la toma de decisiones desde un punto de vista eficiente y sostenible.

En los siguientes capítulos se van a desarrollar los bloques que componen el Marco de Referencia. El Bloque I se desarrolla en el capítulo 8, el Bloque II se ha dividido en los capítulos 9, 10 y 11 debido a su extensión. El Bloque III, se aborda en el capítulo 12. El Bloque IV, correspondiente a la adaptación del caso genérico al caso particular, se explica a partir del capítulo 13. En ese capítulo se describe la metodología de adaptación de los modelos genéricos a los casos particulares y en los capítulos 14 y 15 se demuestra la aplicación del Marco de Referencia mediante exposición de dos ejemplos de aplicación.

# **Capítulo 8. Bloque I - Modelo genérico del PLI**

## 8.1.Introducción

El primer bloque del MR-DIMPM-LI pretende responder a la problemática identificada de la falta de formalización del PLI y los problemas que ello conlleva, constituyendo una base documental y una referencia de cómo se deben ejecutar el PLI. Para ello, se va a desarrollar el modelo de un proceso genérico de LI, mediante el cual, y juntamente con la descripción del proceso, se pueda quedar documentado y formalizado un PLI estándar que pueda abarcar toda la casuística que se puede dar en dicho proceso. Una clara consecuencia de tener un PLI formalizado es conseguir mejorar la gestión de la LI, obteniendo mayor eficiencia y rentabilidad en los procesos de LI y, sobretodo, facilitando la toma de decisiones en dicho proceso. Por otra parte, el estudio, la descripción y el modelado de las decisiones clave que se desarrollan en el PLI, ayudará a los gestores o decisores a tener una visión integrada de las mismas y a entender mejor los aspectos a considerar en dichas decisiones, así como su impacto.

En la figura siguiente (Figura 21) se destaca, con un marco rojo, el ámbito del Marco de Referencia que se va a tratar en el capítulo.

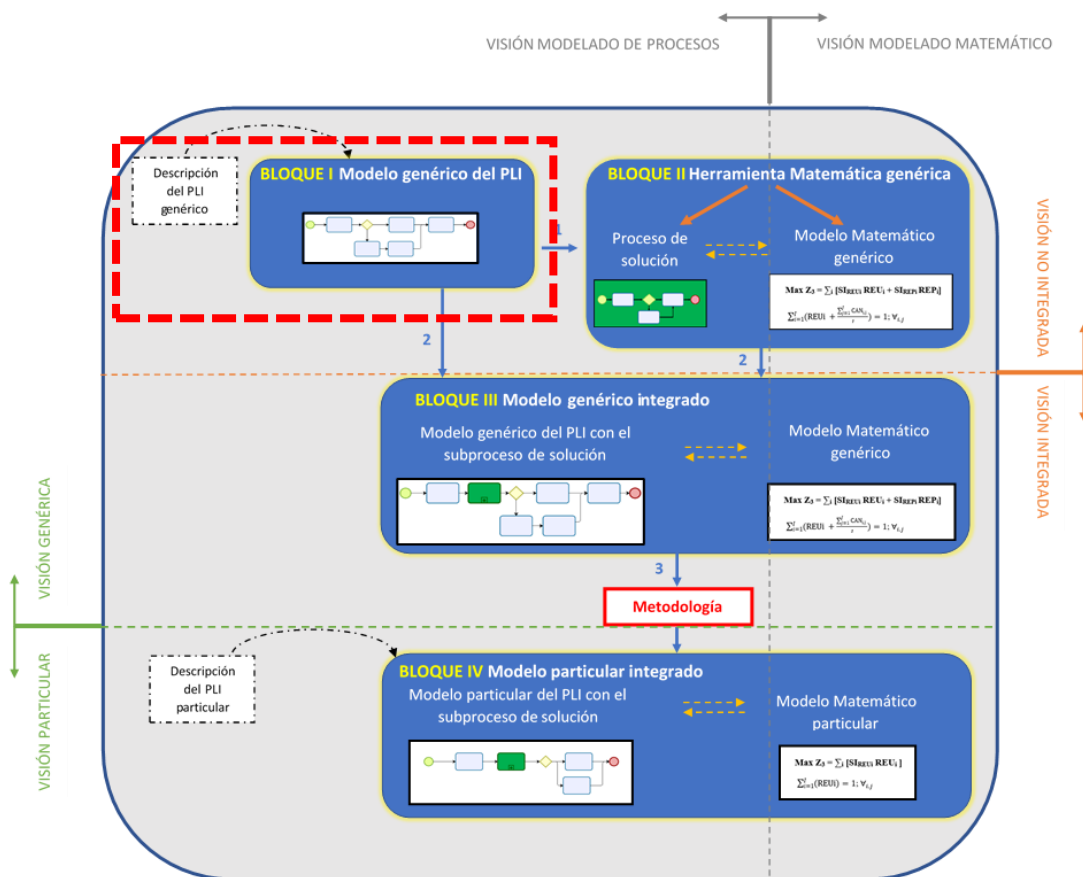


Figura 21. Ámbito del Marco de Referencia que se trabaja en el presente capítulo (Elaboración Propia)

El contenido de este proceso genérico que se quiere desarrollar, es decir, el conjunto de actividades que compondrían un PLI genérico, se plantea a partir de los trabajos consultados en el estado del arte que han permitido un conocimiento profundo de dicho proceso.

Este modelo de proceso se va a plantear a un nivel lo suficientemente genérico como para que pueda abarcar o representar un PLI de cualquier CdS pero, al mismo tiempo, al suficiente nivel de detalle como para que se recojan todas las actividades importantes que tienen lugar en este proceso. El objetivo es que cualquier empresa pueda adaptar fácilmente este modelo a su situación particular, escogiendo aquellas alternativas que se utilicen en cada caso o haciendo las pequeñas modificaciones que corresponda.

Consecuentemente, el objetivo del presente capítulo es proponer un modelo genérico del PLI que facilite la formalización del proceso y sirva de guía para conocer las actividades principales que lo componen y las decisiones clave que se toman a lo largo del mismo

Considerando, además, que hay etapas clave especialmente complejas y que no son fijas (como la disposición) sino que dependen de lo que ocurra en otras actividades y de las decisiones que se tomen, resulta interesante para esta tesis estudiar la relación que permitirá identificar todos los posibles flujos que se puedan dar en el proceso. Para ello, en la sección 8.2 se relacionan las principales causas que activan el PLI con todas las posibles alternativas de disposición, explicando el grado de relación entre causa y alternativa. Posteriormente, en la sección 8.3, se profundiza en las decisiones clave del PLI mostrando una caracterización de las mismas centrada en la ubicación de estas sobre una estructura genérica de CdSI. Finalmente, en la sección 8.4, se propone un modelo genérico del PLI en el que se ubican también las principales decisiones de la LI. El capítulo se cierra con las conclusiones pertinentes y las referencias de los trabajos consultados.

## **8.2.Relación entre causas que activan el PLI y alternativas de disposición del producto**

Ante la importancia y la complejidad de la DD, y la variedad de alternativas de decisión, se considera necesario definir las conexiones existentes entre las causas que inician o activan el PLI y las distintas alternativas de disposición del producto para ayudar en la toma de decisiones y así poder documentar y modelar mejor el proceso.

A continuación se presenta una tabla (Tabla 11) que muestra la graduación de las relaciones entre las causas que activan el PLI (*apartado 4.2.1*) y las posibles alternativas de disposición (*apartado 4.2.2*) en función de lo frecuentes, lógicas y recomendables que suelen ser las relaciones. Se utilizan para ello tres colores: el verde para representar las relaciones más recomendables para cada causa que genera la LI (como la reventa o reutilización para los casos en los que existen devoluciones por deseo expreso del cliente), el amarillo para mostrar aquellas relaciones posibles, aunque parcialmente recomendables (como reparar productos sin vida útil), y el rojo para indicar aquellas disposiciones no recomendables (como revender o reutilizar productos en condiciones no óptimas).

ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN			CAUSAS QUE ACTIVAN EL PLI					
			Devoluciones de productos			Recuperación de productos		
			Producto en condiciones NO óptimas (1)	Errores diversos (2)	Deseo del cliente (3)	Productos con vida útil (4)	Productos sin vida útil (5)	
Con recuperación de valor	Sin intervenir sobre el producto	Reventa - reutilización (A)	A1	A2	A3	A4	A5	
		Vender Vía outlet o mercado secundario (B)	B1	B2	B3	B4	B5	
		Donación (C)	C1	C2	C3	C4	C5	
	Cierta intervención sobre el producto	Reintroducción al mercado	Reparación - restauración - refabricación (D)	D1	D2	D3	D4	D5
		Aprovechamiento de componentes	Canibalización (E)	E1	E2	E3	E4	E5
			Reciclaje (F)	F1	F2	F3	F4	F5
			Incineración - Vertido (G)	G1	G2	G3	G4	G5
Sin recuperación de valor								

Recomendable	Parcialmente recomendable	No recomendable
--------------	---------------------------	-----------------

**Tabla 11.** Relación entre causas que activan el proceso de LI y alternativas de disposición (Elaboración propia).

A continuación, se describen las distintas alternativas de disposición (en filas) para cada una de las causas de activación del PLI (en columnas), enumeradas en el mismo orden en que se han enumerado en la anterior tabla:

### **1.- Devoluciones por producto en condiciones no óptimas:**

Cuando un producto es devuelto por no estar en óptimas condiciones (defectuoso, dañado o caducado), no resulta recomendable revenderlo o reutilizarlo directamente, (según la numeración de filas y columnas de la Tabla 11, este caso correspondería a la celda A1), ya que no tiene todas sus características nuevas o intactas.

En estos casos, y dependiendo de la razón que haya provocado la devolución, las alternativas de disposición del producto más recomendables pueden variar entre venta en el mercado secundario, donación o intervenir para sacarlo de nuevo al mercado. Se puede poner a la venta en un mercado secundario o un comercio tipo outlet (B1), siempre que su funcionamiento siga siendo óptimo, a un precio más asequible para cliente y asumiendo éste que el producto no se encuentra en el estado original de fábrica. Se puede optar por donarlo (C1) en los casos que el producto ya no se pueda poner en circulación. Finalmente, se puede realizar algún tipo de intervención (D1), si la idea pasa por sacar de nuevo al mercado el producto dañado o defectuoso, con las máximas garantías

Cuando este tipo de productos no se puede sacar de nuevo al mercado, con las suficientes garantías, sería recomendable aprovechar parte de sus componentes para la fabricación de nuevos productos (E1) o incluso que se reciclara el artículo para aprovecharlo en la fabricación de nuevos productos (F1). Si al artículo en cuestión no se le puede sacar ningún tipo de provecho, la última salida a adoptar por parte del comerciante o fabricante será eliminarlo correctamente y de una forma respetuosa con el medio ambiente (F1).

### **2.- Devoluciones por errores diversos:**

El producto también puede haber sido devuelto por causas ajenas a su estado, debido a que se han podido producir errores diversos como, por ejemplo, un embalaje en mal estado o entrega fuera de plazo. En estos casos, se considera que el producto se encuentra en perfecto estado y que sigue manteniendo las mismas características originales, por lo que las operaciones más recomendables pasan por volver a poner el producto en el mercado sin intervenir apenas sobre él (A2).



Aunque, es posible que el artículo haya perdido alguna de sus características básicas y no pueda seguir vendiéndose como nuevo, por tanto, una alternativa bastante recomendable es volver a poner en el mercado mediante una tienda outlet o a través de un mercado secundario (B2).

Asimismo, existe la posibilidad de que el producto sea donado (C2), puesto que resulte muy difícil volver a ponerlo en el mercado con éxito.

Del mismo modo, podría darse el caso de que hubiera que hacer alguna modificación o mejora para poderlo sacar de nuevo al mercado, por lo que la alternativa de la reparación, aunque menos habitual, también podría generarse en estos casos (D2).

Igualmente podría ocurrir que no se pudiera vender de nuevo el producto, pero sí que se pudieran aprovechar sus componentes para la fabricación de nuevos artículos mediante la canibalización (E2) o el reciclaje (F2), siendo disposiciones respetuosas con el medio ambiente y más rentables que no hacer nada.

Si ninguna de las disposiciones planteadas se puede llevar a cabo, tal vez la alternativa más adecuada sea eliminarlo correctamente mediante incineración o vertido (G2).

### **3.- Devoluciones por deseo del cliente:**

En el caso de devolución de productos por deseo expreso del cliente, se plantean las mismas recomendaciones de disposición que en el caso anterior (devoluciones por errores diversos), puesto que el producto se encuentra en perfecto estado y mantiene las características originales.

### **4.- Producto recuperado con cierta vida útil:**

Si el producto ya ha sido usado y no se encuentra en óptimas condiciones, es posible que pueda seguir siendo utilizado aún con ciertas garantías, siempre que no haya agotado su vida útil. Evidentemente, el estado en el que se encuentre el artículo determinará en gran medida la disposición que se le pueda dar. En este caso, las alternativas de poner de nuevo el artículo en el mercado, sin intervenir en él, pueden ser recomendables (A4, B4 y C4).

Cuando los productos no se puedan sacar al mercado sin intervenir sobre ellos, la opción de repararlos o restaurarlos puede ser interesante (D4). Si no se puede intervenir sobre el producto para volverlo a poner en el mercado, la opción de la canibalización resultará muy interesante, pues al tener aún cierta vida útil, pueden servir los componentes en la elaboración de nuevos productos (E4).

Llegados al punto en el cual se ha intentado aprovechar al máximo el rendimiento del artículo y de sus componentes, quedaría por definir como parcialmente recomendable, la disposición de recuperar los materiales para usarlos como materia prima, es decir, reciclar aquellos componentes que puedan ser útiles para poder elaborar nuevos productos (F4).

Al igual que en los casos anteriores, una vez agotadas todas las alternativas comentadas, cuando ya no se pueda extraer ningún valor o uso, darle un tratamiento correcto de eliminación podría ser la última vía a adoptar (G4).

#### **5.- Producto recuperado sin vida útil:**

Serán considerados sin vida útil, aquellos artículos que no puedan seguir funcionando ni utilizados para su función en las condiciones en las que se encuentran. Por tanto, al contrario que en el caso anterior, aquellas alternativas de disposición sin intervenir sobre el producto quedarían descartadas (A5, B5 y C5).

Con la intención de volver a sacar el producto al mercado o darle aún cierto uso, se podría plantear una reparación o refabricación del mismo elemento (D5). Aunque, generalmente, para aquellos productos que tienen agotada su vida útil, resultará más recomendable aprovechar los componentes que aún puedan tener cierta utilidad (E5).

Otra alternativa de disposición recomendable pasa por recuperar los materiales, mediante el reciclaje, para utilizarlos de nuevo como materia prima en la elaboración de nuevos elementos (F5). Por último, la incineración o vertido (G5), es decir, una destrucción controlada, podría ser otra alternativa posible.

### **8.3. Caracterización de las decisiones clave de la LI**

Formalizar y estructurar el PLI para modernizar la CdS requiere conocer las decisiones que se toman a lo largo del proceso. Después de identificar, describir y clasificar las

decisiones clave del PLI, en el capítulo 4 y en base a la revisión de la literatura, en este capítulo se van a caracterizar las decisiones desde el punto de vista de **quién y cuándo** se toma cada una de ellas. Esta caracterización pretende ayudar a los decisores a tener una visión global del PLI y a entender mejor, tanto los aspectos a considerar en dichas decisiones como su impacto.

Para ello, se muestra a continuación una CdS de lazo cerrado genérica (Figura 22), en la que se combina la logística directa o tradicional y la LI, distribuyendo entre los diferentes agentes que componen la CdS las decisiones clave de la LI: estructura y capacidad de la red, rutas logísticas, políticas empresariales de precios y devoluciones, planificación de la producción con productos recuperados y disposición de productos.

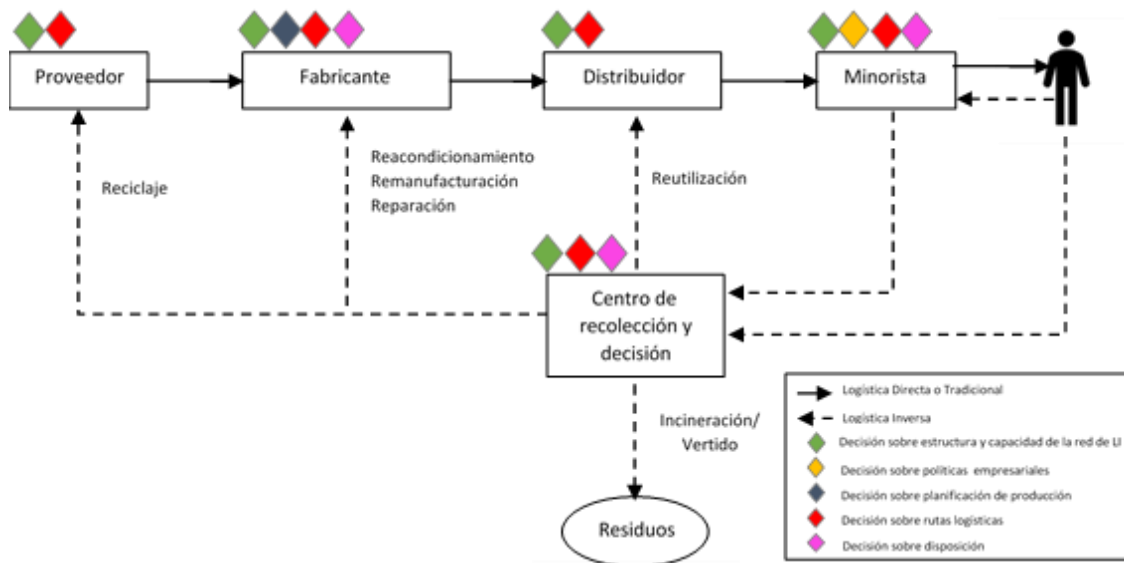
Se puede apreciar que todos los agentes tienen poder de decisión sobre **la estructura y capacidad de la red de LI**, así como sobre las **rutas logísticas**, ya que el itinerario a realizar por parte de los vehículos dentro de la CdSI es decidido, generalmente, en cada uno de los puntos de la red entre los que se trasladan los productos y/o sus componentes.

Con respecto a las **políticas empresariales de precios y devoluciones**, aunque son determinadas, a nivel general, en el seno de la compañía por la alta dirección, habitualmente son llevadas a cabo en el minorista, justo en el punto de contacto con el cliente, informando en cada caso de la acción acordada.

Asimismo, la decisión correspondiente a la **planificación de la producción con los productos recuperados** es tomada, habitualmente, por el fabricante en el momento que se ponen a su disposición los productos recuperados o sus componentes.

La decisión sobre la **disposición** a realizar a cada producto resulta un poco más compleja de ubicar en el esquema, ya que puede ser: a) tomada íntegramente en el momento en el que la red de LI obtiene un producto recuperado o devuelto y se decide qué disposición aplicarle para poder obtener el mayor rendimiento, o bien b) tomada parcialmente, en primer lugar, por el minorista que consigue darle una respuesta rápida al cliente y, más tarde, por el encargado de la clasificación cuando el producto llega al centro de recolección y decisión, si es el caso, se determinaría el tratamiento definitivo a aplicar al producto. Por último, es posible que en el fabricante aún se pueda decidir sobre la disposición definitiva a aplicar al producto. Por esta razón, la DD se ha representado en los distintos eslabones de la CdS.

Con la intención de poder facilitar la comprensión e identificar más fácilmente las decisiones en los modelos de CdSI y de PLI que se presentarán a continuación, se ha asignado una figura de diamante con un color diferente a cada decisión.



**Figura 22.** CdSI de lazo cerrado con la ubicación de las decisiones clave (Elaboración Propia)

Obsérvese que la decisión clave del PLI o DD (diamante de color rosa) se ha ubicado en tres zonas diferentes (minorista, fabricante y centro de recolección y decisión) queriendo representar así que son estos eslabones de la CdS los que normalmente deciden sobre el tratamiento a aplicar a cada producto de LI y sobre los que está ideado el MR-DIMPM-LI.

#### 8.4. Propuesta de PLI en base a modelado de procesos de negocio

A partir de toda la información anterior, se propone a continuación un proceso genérico de LI en el que, además, se puede apreciar el momento o momentos que se toma cada decisión (Figura 23).

En este proceso sólo se muestran las decisiones tácticas/operativas, puesto que las decisiones estratégicas se suelen tomar previamente y permanecen inalteradas durante un largo periodo de tiempo.

La DD a aplicar se representa en la figura con un pequeño diamante de color rosa en la parte superior derecha de los símbolos de decisión de BPMN (*Business Process Management Notation*) en donde se toman estas decisiones. De esta forma, se puede apreciar cómo la DD a realizar es tomada en diferentes puntos del proceso. En el diagrama

se indica cada una de las alternativas a escoger en cada momento que se plantea la elección del tratamiento, determinando el camino a seguir para cada una de ellas.

A parte de este tipo de decisión, que suele tener las posibles respuestas acotadas y representadas en el diagrama de proceso de LI, existen otras dos decisiones clave, como son las rutas logísticas y la planificación de la producción, que contienen respuestas mucho más amplias. Por ello, se han asignado en la parte superior derecha de la casilla de actividad correspondiente al momento en el que se toma la decisión, también mediante un pequeño diamante con el color correspondiente a cada decisión.

Cada vez que haya que trasladar los productos y/o componentes se debería tomar la decisión sobre las rutas logísticas; por eso se ha asignado la decisión de rutas logísticas en cada punto en el que se establece una ruta de transporte. Asimismo, la decisión correspondiente a la planificación de la producción se tomará en el momento en el que se interviene sobre el producto, tal y como se ha indicado en la Figura 23. A continuación, se describe detalladamente el funcionamiento del diagrama propuesto.

- **Descripción del diagrama genérico del PLI propuesto:**

El PLI se inicia en el momento que el cliente se pone en contacto con la empresa, bien de manera telefónica, presencial o a través de comunicación electrónica. Una vez el PLI ya está en marcha, la primera cuestión que debe plantearse la empresa es si tratar o no la devolución. En este caso, la empresa puede hacer una primera valoración de si le interesa/puede/debe o no tratar el producto y a partir de ahí seguir el proceso. En el caso que la empresa decida no tratar el producto, la siguiente cuestión sería saber si existe la necesidad de compensar al cliente, para que, en caso afirmativo, ejecutar la compensación antes de dar por finalizado el proceso. Un ejemplo muy claro sería una compra de un pequeño cómic a través del comercio electrónico. Puede existir el caso que el cliente, una vez recibido el producto, decida devolverlo y al ponerse en contacto con la empresa, esta decida no tratar la devolución (debido básicamente a su escaso precio). En ese caso, la empresa no trataría la devolución, pero si debiera de compensar al cliente. En cambio, si un comprador vuelve a la tienda de ropa a devolver un producto, después del plazo indicado para ello, la tienda no tratará el producto y no se compensará al cliente.

En el momento que la empresa decide tratar la devolución o recuperación, inmediatamente después debería plantearse si el cliente necesita un producto de

sustitución, para que, en caso afirmativo, plantee la opción de aprovechar el viaje de recogida del producto a devolver o recuperar para entregar el producto de sustitución.

A continuación, la cuestión que debe plantearse la compañía es si el cliente precisa que se le haga una intervención in-situ, como suele pasar con los grandes electrodomésticos, por ejemplo. En caso afirmativo, la compañía realizaría una intervención in-situ sobre el producto, determinando si el producto queda arreglado o no. Tanto si el producto queda arreglado como si no, la empresa debe plantearse si compensar al cliente o no, de manera que se cubran las molestias ocasionadas. En el caso que se arregle el producto, acabaría ahí el proceso, en cambio, si el producto no se arregla, la empresa también podría plantearse tratar o no el producto en sus instalaciones.

Cuando se decida no tratar el producto, la compañía daría por finalizado el proceso tras analizar la cuestión de la compensación al cliente. En cambio, si la empresa decide tratar el producto, se llevará el producto a sus instalaciones.

Cuando se decide tratar un producto y no precisa de una intervención in-situ, la compañía debe plantearse si se precisa un transporte para recoger el producto y traerlo hacia sus instalaciones. En caso afirmativo, se analizarán las opciones de entrega (y recogida si procede), marcando la ruta, el tipo de transporte, la fecha, etc. Posteriormente, se negociarán la fecha y las condiciones de entrega (y recogida si procede) con el cliente. Si al final no hubiese acuerdo con el cliente, y no se pudiese ejecutar el tratamiento, el proceso se daría por finalizado tras valorar la necesidad de aportar compensación y ejecutarla o no.

Cuando la compañía cuenta con la conformidad del cliente para recoger el producto, se reserva el transporte correspondiente, se le asigna la ruta y se realiza el correspondiente transporte de la mercancía para recibirla en la empresa e inspeccionarla. En ese momento, la empresa se enfrenta a la Decisión sobre Disposición (DD), determinando, bien si el producto es apto para su reuso o reventa, bien si se opta por intervenir sobre el producto para sacarlo de nuevo al mercado o bien si se decide aprovechar los componentes. Dicha decisión, como eje central de la tesis, se muestra en el centro de la propuesta de PLI genérico que se muestra a continuación.

PARTE IV. PROPUESTA.  
 Capítulo 8. Bloque I – Modelo genérico del PLI.

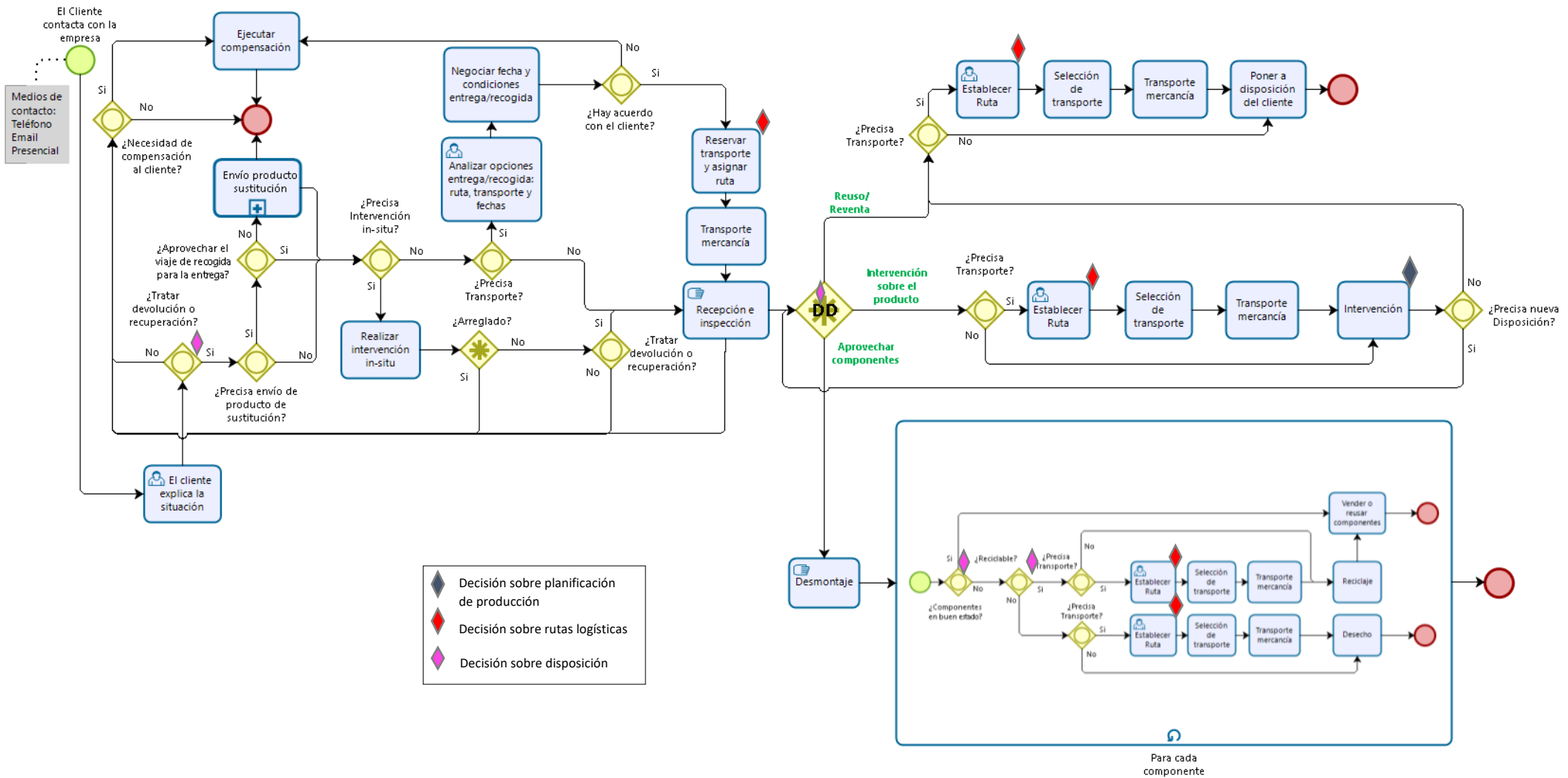


Figura 23. Propuesta de Proceso de Logística Inversa genérico con la ubicación del momento de decisiones clave (Elaboración Propia)

En el momento que la compañía decide reutilizar o revender el producto tal cual está, el siguiente paso será ponerlo a disposición del cliente lo más rápido posible, realizando, si es el caso, el transporte oportuno para que así sea.

Cuando la compañía opta por intervenir sobre el producto, es posible que dicha intervención se realice en unas instalaciones diferentes con respecto a las que se encuentre en ese momento. En ese caso, se realizará el correspondiente transporte hasta el lugar donde se pueda intervenir sobre el producto.

La intervención sobre el producto se realizará en el grado en que se decida, según la conveniencia de cada alternativa (reparación, reacondicionamiento o remanufactura). Tras la intervención, es posible que la empresa se plantee si el producto precisa de una nueva disposición, por si al final no salen las cosas como se esperaban. En caso contrario, se intentará poner el producto a disposición del cliente lo más pronto posible, al igual que sucedía en el caso de la reutilización o reuso.

Cuando en la compañía se decide por la alternativa de aprovechar los componentes, la primera operación que debería realizarse es el desmontaje del producto. A partir de ese momento, se planteará para cada componente si está en buen estado, y así poder venderlo o usarlo como materia prima para otros productos. En el caso de que no esté en buen estado, la siguiente opción será la de reciclarlo, realizando el transporte (si fuese necesario) para poder ejecutar el reciclaje.

Si el componente no estuviese en buen estado y no se pudiese reciclar, la compañía lo desechará para darle una eliminación controlada, por parte de las empresas especializadas.

## **8.5. Conclusiones**

El modelado de procesos se considera una herramienta idónea para ayudar a estructurar y organizar los procesos de negocio de cualquier compañía y así, de paso, formalizar el proceso.

En el capítulo 8, se ha propuesto un modelo genérico para el PLI, de manera que quede recogida toda la variedad de casos que tiene lugar en dicho proceso. Esta propuesta ha venido determinada, en primer lugar, por el estudio de las relaciones entre las causas que generan el PLI y las distintas alternativas de disposición del producto. En segundo lugar,



se han mostrado las decisiones clave que lleva asociadas el PLI sobre una estructura o modelo general de CdSI, favoreciendo el entendimiento de la gestión del PLI.

Finalmente, y partiendo de toda la información recabada, se ha propuesto un modelo genérico del PLI, y se ha representado sobre él el flujo de las decisiones y el momento en el que estas se toman. En este sentido, se puede apreciar cómo la decisión correspondiente a la disposición a aplicar es tomada en diferentes puntos de decisión del diagrama del PLI.

A partir del siguiente capítulo, se presenta el Bloque II del Marco de Referencia, correspondiente a la herramienta matemática genérica. Debido a su elevada extensión y con la idea de no perder el hilo conductor de la tesis, la herramienta matemática genérica propuesta se expondrá en tres capítulos, haciendo referencia, el primero de ellos (Capítulo 9) a la presentación del modelo matemático, el segundo (Capítulo 10) a la descripción del procedimiento de solución y, el tercero (Capítulo 11), a la validación de la herramienta mediante experimentación.

**Capítulo 9. Bloque II - Herramienta  
Matemática Genérica: Modelo  
Matemático**

## 9.1.Introducción

La complejidad y la trascendencia que caracterizan a la DD, la convierten en una decisión fundamental para el correcto funcionamiento del PLI. Sin embargo, se ha podido constatar en la literatura que existen pocos **modelos de ayuda a la toma de decisiones** centrados en la DD. Además, de todos los modelos analizados, ninguno de ellos constituye un “Marco de Referencia” que aborde el modelado de procesos y el modelado matemático conjuntamente. Por otra parte, muchos de los **modelos matemáticos** consultados incorporan objetivos de sostenibilidad, no obstante, son muy pocos los que abordan la sostenibilidad desde las tres perspectivas: económica, ambiental y social. En este apartado se aborda el desarrollo de una herramienta matemática, que sirva de ayuda a la toma de decisiones sobre la disposición de productos en un contexto de LI considerando los tres aspectos de la sostenibilidad.

En la figura siguiente (Figura 24) se destaca, mediante un marco rojo, la parte del Marco de Referencia que se va a tratar en el presente capítulo.

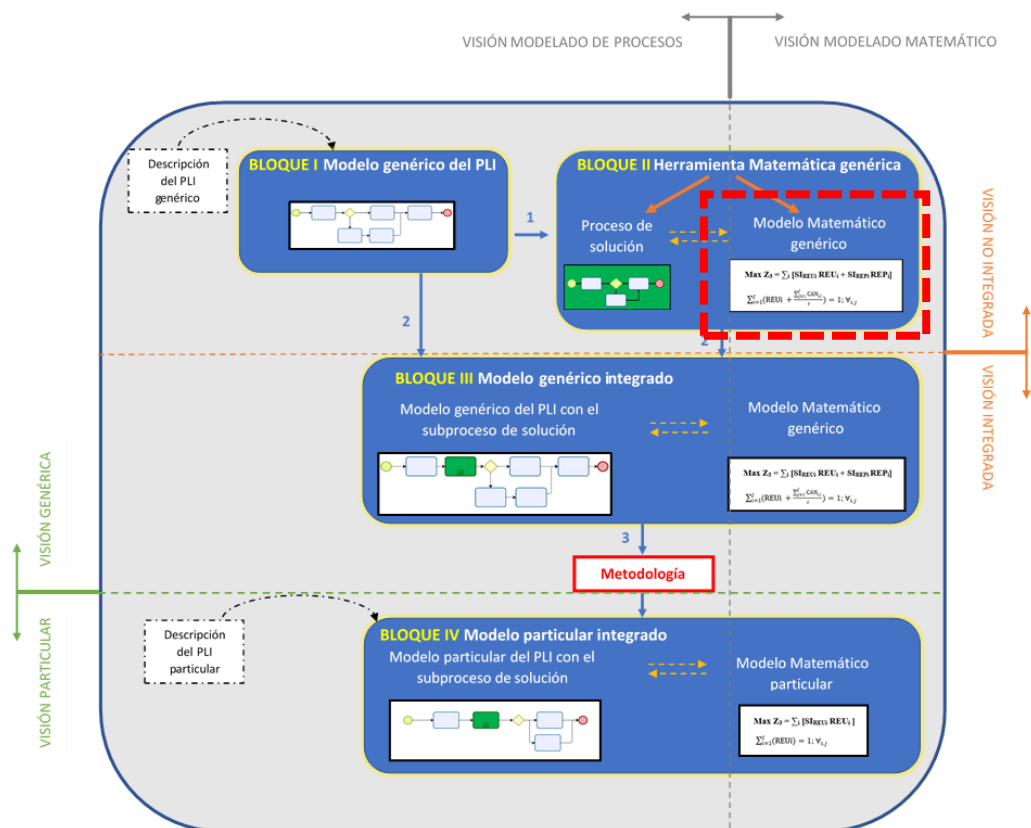


Figura 24. Ámbito de trabajo del capítulo sobre el Marco de Referencia Propuesto (Elaboración Propia)

La herramienta matemática estará compuesta por dos elementos: un **modelo matemático**, que ofrecerá la mejor alternativa para cada dimensión de la sostenibilidad, y un **proceso de solución**, que permitirá seleccionar entre las alternativas de disposición, aquella que sea más conveniente desde un punto de vista global, con relación a las tres dimensiones de la sostenibilidad. La descripción de la herramienta se va a realizar en dos capítulos: tratando el modelo matemático en el capítulo actual y el proceso de solución en el siguiente capítulo. Además, se dedicará un capítulo adicional a la validación de la herramienta para comprobar que esta funciona y proporciona resultados lógicos en una serie de situaciones tipo.

Concretamente, en este capítulo, se va a describir el modelo matemático (MM) genérico, comenzando en la sección 9.2 con una definición estructurada del problema que facilite el posterior desarrollo y presentación del modelo matemático, en la sección 9.3, se muestran todos los aspectos de sostenibilidad (económicos, ambientales y sociales) que están relacionados con cada una de las alternativas de disposición, con la intención de configurar posteriormente los parámetros necesarios para el MM.

Posteriormente, en la sección 9.4, se definen los índices y los parámetros del modelo correspondientes a los aspectos de sostenibilidad expuestos anteriormente. Las variables de decisión se introducen en la sección 9.5 y, en la sección 9.6, se propone la triple función objetivo. Posteriormente, en la sección 9.7 se describen las restricciones del modelo, para acabar el capítulo en la sección 9.8, con las conclusiones y las referencias utilizadas.

## **9.2. Definición estructurada del problema a resolver con el MM**

En la DD, tal y como se está definiendo e interpretando en esta tesis, se pretende maximizar la rentabilidad económica y el impacto social, y minimizar el impacto ambiental, constituyendo así un problema de optimización multi-objetivo (MOO). En el modelo matemático a diseñar, las decisiones se toman en un solo nivel y para un horizonte temporal a corto plazo, ya que se trata de decisiones operativas.

El problema se modela a través de la programación lineal de entera mixta (MILP) y se puede resumir de la siguiente forma:

Dado:

- Un producto devuelto por el cliente o recuperado

- Un conjunto cerrado de posibles alternativas de disposición (o tratamiento) sobre dicho producto devuelto o recuperado
- Una **rentabilidad económica** correspondiente a cada una de las alternativas de disposición definido por ingresos y costes:
  - Ingresos esperados en cada una de las alternativas.
  - Costes correspondientes a cada una de las acciones que hay que llevar a cabo en cada una de las alternativas de disposición.
- Un **impacto ambiental** asociado a las acciones que hay que llevar a cabo en cada una de las alternativas de disposición.
- Un **impacto social** correspondiente a cada una de las operaciones relacionadas con las alternativas de disposición

Determinar

- La alternativa de disposición más adecuada para el producto o para sus componentes.

Para

- Maximizar la rentabilidad económica
- Minimizar el impacto ambiental
- Maximizar el impacto social

Considerando ocho alternativas de disposición:

1. Reutilización/reventa
2. Reparación
3. Reacondicionamiento
4. Remanufacturación
5. Canibalización
6. Reciclaje
7. Incineración
8. Vertido

La decisión sobre la disposición **se inicia cuando un producto es entregado a la empresa por el cliente**, bien por devolución o por fin de uso. Justo en el momento en el

que la empresa receptora tenga que decidir qué hacer con el producto de entrada, es cuando el modelo matemático se puede aplicar por parte del decisor para proporcionar una respuesta eficiente y, al mismo tiempo, sostenible para la empresa.

**Para poder tomar esa decisión**, se realizará la estimación de los impactos, según cada una de las alternativas de disposición, con respecto a la repercusión económica, ambiental y social.

Aunque, a veces, la maximización de un objetivo (por ejemplo, crear más puestos de trabajo) puede significar la minimización de otro (por consecuencia, menor rentabilidad económica), la elección de la alternativa más adecuada vendrá dada por la resolución de un **conflicto** entre los objetivos de maximizar la rentabilidad económica, minimizar el impacto ambiental y maximizar el impacto social. De esta forma, la función multi-objetivo a resolver se puede representar de la siguiente manera:

$$\text{Maximizar función objetivo} = W_1 (\text{Rentabilidad Económica}) - W_2 (\text{Impacto Ambiental}) + W_3 (\text{Impacto Social})$$

Donde  $W_1$ ,  $W_2$  y  $W_3$  son factores de ponderación que regulan la importancia que el decisor quiere otorgar a cada uno de los tres apartados de la función objetivo: económico, ambiental y social. De esta forma, el objetivo conjunto de maximizar la rentabilidad económica, minimizar el impacto ambiental y maximizar el impacto social, es adaptable al interés de cada decisor en cada situación

### **9.3. Identificación de los aspectos de sostenibilidad a considerar en cada alternativa de disposición de LI**

Las distintas alternativas de decisión tienen asociadas unas acciones que se relacionan a su vez de distinta forma con los aspectos económicos, ambientales y sociales. Dichos aspectos, para que se puedan considerar en el MM y la DD pueda así ser sostenible, se han desglosado en parámetros.

**A continuación, se determinan los aspectos económicos, ambientales y sociales referentes o asociados a cada alternativa de disposición de LI, considerando las ocho alternativas explicadas en apartados anteriores** (reutilización, reparación, reacondicionamiento, remanufacturación, canibalización, reciclaje, incineración y vertido).

### 9.3.1. Aspectos económicos

Con la idea de medir la influencia de cada DD sobre los aspectos económicos, se puede cuantificar primeramente el resultado de una decisión y compararla con el resultado de aplicar otra decisión, cuantificando la diferencia entre los ingresos y los costes que se han generado o se prevé que se generen (Ortegon *et al.*, 2013).

#### 9.3.1.1. Ingresos

Un aspecto clave a la hora de cuantificar el factor económico que afecta a las distintas alternativas de disposición, es el ingreso económico que la compañía recibe a cambio del producto. El precio al que se pueda vender de nuevo el producto o el rendimiento económico que se pueda obtener de los componentes de este, determinarán los ingresos de una alternativa de disposición frente a las demás.

Los casos en los que la empresa recibe una contraprestación económica por vender productos que han sido recuperados o devueltos, se han agrupado de la siguiente forma:

- **Ingresos comunes a las alternativas según su finalidad:**
  - Ingresos obtenidos por **reintroducir de nuevo el producto en el mercado**, tras la reutilización/reventa, reparación, reacondicionamiento o remanufacturación.
  - Ingresos que se obtienen por el **aprovechamiento de los componentes**, en el caso que ya no se pueda reintroducir el producto como unidad en el mercado, a través de la canibalización o el reciclaje.
  - Ingresos que pueden obtenerse por la **incineración del producto y/o sus componentes**.
- **Otros Ingresos comunes a todas las alternativas**
  - Ingresos que pueden obtener las compañías al tratar los productos recuperados y/o devueltos, independientemente de la alternativa de disposición a aplicar, como son las subvenciones.

Siguiendo esta estructura, y para facilitar el entendimiento sobre los ingresos, se presenta a continuación una figura (Figura 25) que muestra los tipos de ingresos por colores: verde para ingresos comunes a las alternativas con la misma finalidad y marrón para ingresos comunes a todas las alternativas.



Figura 25. Estructura de ingresos relacionados con la LI (Elaboración propia).

A continuación, se explicarán cada uno de los tipos de ingresos, empezando por los ingresos comunes agrupados según la finalidad y siguiendo, después, por los otros ingresos comunes a todas las alternativas.

9.3.1.1.1. *Ingresos obtenidos por reintroducción en el mercado*

Desde el punto de vista económico, la opción de reintroducir el producto en el mercado aportará la mayor cuantía económica a la empresa, en comparación con el resto de las opciones de ingresos comentadas.

El ingreso por venta en el mercado dependerá, generalmente, de la calidad y del estado del producto, por lo que la alternativa de disposición seleccionada para cada producto será fundamental para poder determinar su precio de venta.

Por ello, se establecerá un precio de venta diferente según la disposición que se le haya aplicado al producto:

**Ingreso de venta por Reutilización/Reuso:** En estos casos, generalmente el precio suele ser el mismo que tenía el producto en su venta inicial. En aquellos casos en los que el producto sea vendido en el mercado secundario (tipo outlet) el precio de venta suele ser sensiblemente inferior que en el caso anterior. En los



casos en los que la reutilización o reuso se realice a través de una donación, no suele conseguirse ningún ingreso económico al respecto.

**Ingreso de venta por Reparación:** Teniendo en cuenta que la reparación sirve para volver a poner en funcionamiento el producto, en estos casos, normalmente, el precio de mercado será sensiblemente inferior al precio de venta inicial, por el desgaste propio del producto.

**Ingreso de venta por Reacondicionamiento:** La intervención que se realiza sobre el producto por reacondicionamiento, consiste en aportarle una calidad específica que el producto ha ido perdiendo, por tanto, el nivel de calidad del producto reacondicionado será sensiblemente superior al conseguido con la reparación. Por ello, normalmente, el precio de salida al mercado tras el reacondicionamiento sea superior que tras la reparación.

**Ingreso de venta por Remanufacturación:** La finalidad de este tipo de tratamiento se basa en dotar al producto recuperado la misma calidad original que el producto nuevo. De esta forma, el precio de venta de salida al mercado tras la remanufacturación podría ser muy parecido al precio de venta inicial del producto o incluso superior.

#### *9.3.1.1.2. Ingresos obtenidos por aprovechamiento de componentes*

Este concepto de ingreso se obtiene en los casos en los que el producto recuperado no vuelve a ser reintroducido en el mercado, pero se pueden aprovechar sus componentes para ser vendidos individualmente, para elaborar otros productos o para ser reciclados:

**Ingreso de venta por Canibalización:** La compañía puede recibir ingresos por cada uno de los componentes que haya podido vender de nuevo o utilizarlo como sustituto de componentes nuevos en la elaboración de productos.

**Ingreso de venta por Reciclaje:** En el caso de aplicar el tratamiento de reciclaje a los componentes, la empresa puede obtener ingresos por reciclar cada componente.

#### *9.3.1.1.3. Ingresos obtenidos por generación de energía*

Cuando un producto recuperado no puede volver a reintroducirse en el mercado ni se pueden aprovechar sus componentes para darles un nuevo uso, la alternativa de la

incineración de los productos o componentes puede repercutir económicamente de manera positiva gracias a la obtención de energía.

9.3.1.1.4. *Otros ingresos*

La compañía puede obtener ingresos adicionales a los anteriormente definidos, tratando productos devueltos o recuperados para la gestión de su LI.

Dichos ingresos pueden venir, mayoritariamente, de aportaciones dadas por las administraciones públicas en forma de subvenciones, por las que la empresa recibe una compensación económica debido al tratamiento de productos devueltos o recuperados.

Consecuentemente, los ingresos correspondientes a cada alternativa vendrán dados por los ingresos comunes según finalidad (excepto para la alternativa de vertido que no aporta ingresos) más los otros ingresos comunes a todas las alternativas que se puedan percibir en forma de subvención, como se puede apreciar en la figura siguiente:



Figura 26. Estructura de ingresos relacionados con la LI con el desglose de los ingresos comunes según finalidad y de los otros ingresos comunes a todas las alternativas (Elaboración propia).

9.3.1.2. *Costes*

Los costes de las distintas alternativas de disposición se calculan identificando, previamente, las **operaciones del PLI que** se llevan a cabo para ejecutar cada una de las alternativas y, posteriormente, **estimando el coste** que dicha operación conlleva a la empresa.

Para ello, lo primero que se debe tener en cuenta es que existen algunas operaciones que son **comunes a algunas alternativas** y otras que son específicas de cada una de ellas. Por ejemplo, las operaciones de recuperación, transporte, recogida, limpieza, inspección y clasificación (Hazen *et al.*, 2011; Hazen *et al.*, 2012; Keivanpour *et al.*, 2014; Lalmazloumian, 2014; Li *et al.*, 2009; Tsai y Hung, 2009), aparecen en todas las alternativas, independientemente del tipo de producto y del tratamiento que se le aplique.

A parte de estas operaciones comunes a todas las alternativas, existen otras **comunes en algunas alternativas**. Por ejemplo, en el caso de que un producto usado o devuelto vaya a reventa o a reutilización. En estos casos, bien sea por el canal tradicional, o vía outlet, el producto se reintroduce en el mercado siguiendo las mismas operaciones. Las operaciones **de reintroducción en el mercado** en el caso de la reventa o reutilización también son comunes para las alternativas de reparación, reacondicionamiento y remanufacturaación, eso sí, después de haber intervenido sobre el producto.

En cambio, en la canibalización, los componentes se reutilizan, pero el producto no se restaura por completo ni se vende, por lo que no sigue el proceso de reintroducción en el mercado especificado y, por consiguiente, no se le aplican dichos costes correspondientes. De esta forma, a parte de aquellos costes comunes a todas las alternativas, se categorizarán los costes comunes según la finalidad de las alternativas de disposición: reintroducción en el mercado, aprovechamiento de componentes o eliminación controlada.

A parte de los costes comunes, cada alternativa tiene asociadas operaciones del PLI distintas que conllevan unos **costes diferentes y específicos**, como cuando un producto se repara o se recicla.

Teniendo esto en cuenta, cabe afirmar que los costes referentes a cada alternativa de disposición vendrán dados por una suma de: costes similares a todas las alternativas de disposición, costes similares a las alternativas con la misma finalidad y costes específicos de la alternativa.

Siguiendo esta estructura, y para facilitar el seguimiento de los costes de cada apartado, se presenta a continuación una figura similar a la que se ha utilizado para los ingresos, que muestra los tipos de costes por colores: marrón para costes comunes a todas las alternativas, verde para costes comunes a las alternativas con la misma finalidad y azul para costes específicos.

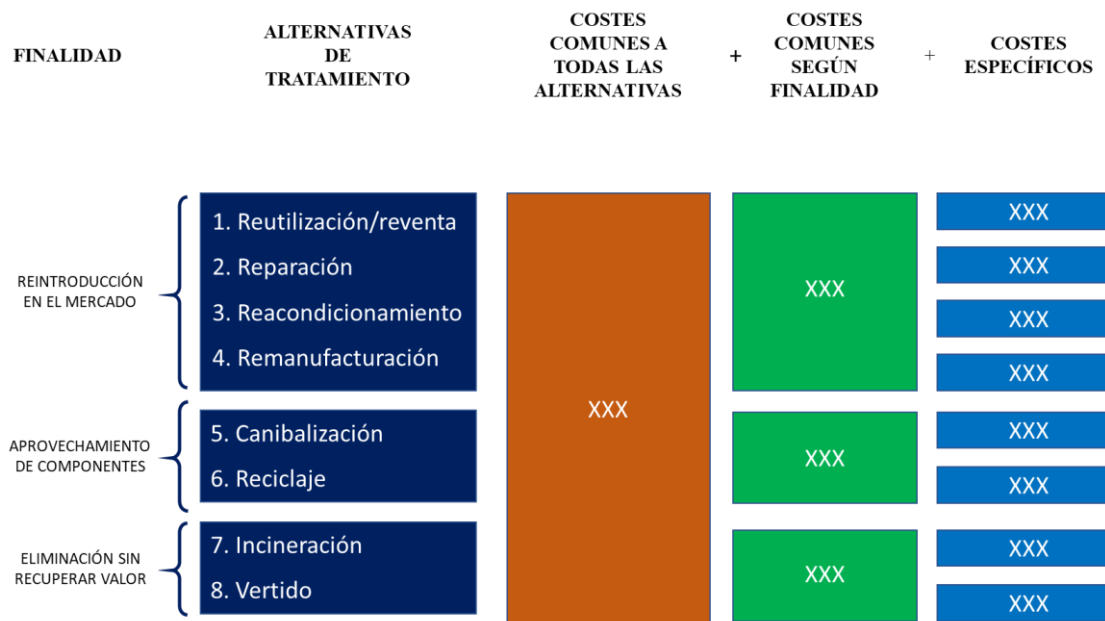


Figura 27. Estructura de costes para las alternativas de tratamiento (Elaboración propia)

La descripción de los costes referentes a las alternativas de disposición, se exponen a partir del siguiente apartado.

9.3.1.2.1. Costes Comunes

Los costes comunes de las alternativas de disposición son aquellos costes referidos a las operaciones que siempre se llevarán a cabo, independientemente de la alternativa de disposición escogida. Dichos costes son:

**Recuperación:** Este coste considera el pago al cliente por la adquisición del producto devuelto o recuperado. Según el caso, dicho coste puede ser nulo, cuando el cliente que entrega el producto no reciba una compensación económica o positivo, en el caso contrario.

**Transporte:** Este componente de coste también podría ser positivo o nulo, según el caso. Los productos usados pueden ser entregados directamente por el cliente al minorista, aunque es posible que el cliente envíe el producto de vuelta. En estos casos, la empresa podría pagar los costes de transporte. Otra opción es que la empresa contrate los servicios de una empresa logística (3PL) externa para recoger los productos de los clientes y transportarlos hasta la compañía. Aunque la ley permite que los costes de transporte sean asumidos por el comprador, muchos

comercios on-line asumen el coste de dicho transporte por aumentar la fidelidad del cliente y favorecer que se repita la compra.

**Recogida:** Para que los productos usados se devuelvan a la CdS y puedan ser tratados, deben ser recogidos, bien por la compañía o bien por una empresa externa. En este apartado, se hace referencia a los costes de manipulación para la recepción de los productos en las instalaciones donde se realicen las acciones posteriores. Además, se pueden incluir también en este apartado, los costes referentes al almacenamiento previo al tratamiento del producto.

**Limpieza:** Después de recoger los productos usados, es posible que estos necesiten ser limpiados. La limpieza puede no ser necesaria en todas las situaciones, pero ciertamente puede ayudar en el proceso de inspección para determinar, más fácilmente, el estado del producto.

**Inspección y clasificación:** Los productos devueltos o recuperados deben inspeccionarse para determinar su estado. En función de su estado, el producto será clasificado según la alternativa de disposición más idónea.

A continuación, se muestra la figura de costes referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los costes comunes a todas las alternativas, comentados en este apartado.



**Figura 28.** Costes referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los costes comunes a todas las alternativas (Elaboración propia)

Estos costes comunes, son costes que suelen estar presentes en todas las alternativas de disposición, aunque no necesariamente en la misma cuantía en todos los casos. Por ejemplo, ante la devolución de un mismo producto del comercio electrónico, se puede dar el caso de que, en las mismas circunstancias, el coste de recuperación sea diferente en función de la política de devoluciones de la empresa, o incluso en función del motivo de la devolución que indique el cliente.

Una clara muestra de esto se aprecia en el gigante americano del comercio electrónico Amazon (con una cifra de ventas neta de más de 230 mil millones de dólares en 2018). Dicha compañía varía el importe de recuperación según el caso o motivo de la devolución expuesto por el cliente (La Verdad, 2019). Por ejemplo, si se devuelve el producto adquirido alegando que “fue comprado por error” o que simplemente “ya no lo quiero/necesito”, el precio que se paga de recuperación es inferior que si, por el contrario, se alega como motivo “funcionamiento o calidad no adecuados”, donde el abono es del 100 % del pago original.

Además, se puede dar el caso de que el coste de transporte sea diferente si es el cliente el que traslada el producto a una empresa de distribución, o incluso a la empresa productora, que si hay que recogerlo en su domicilio particular.

La industria de los equipos eléctricos y electrónicos, por ejemplo, aplica la LI a productos como refrigeradores, televisores y lavadoras. El peso y el volumen de un televisor difiere en comparación con el de un refrigerador, por ejemplo, lo que conduce a diferentes costes de transporte entre los dos tipos de productos.

En definitiva, los costes comunes se dan, pero su valor dependerá de muchos aspectos, como el sector, el tipo de producto, la política de devoluciones de la empresa, la configuración de la red de LI y del estado de producto.

A continuación, se muestran los costes comunes a cada agrupación de alternativas, realizada en el tema 4, en función de su finalidad:

- Reintroducción en el mercado
- Aprovechamiento de los componentes
- Eliminación del producto sin recuperación de valor

9.3.1.2.1.1. Costes Comunes para las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado

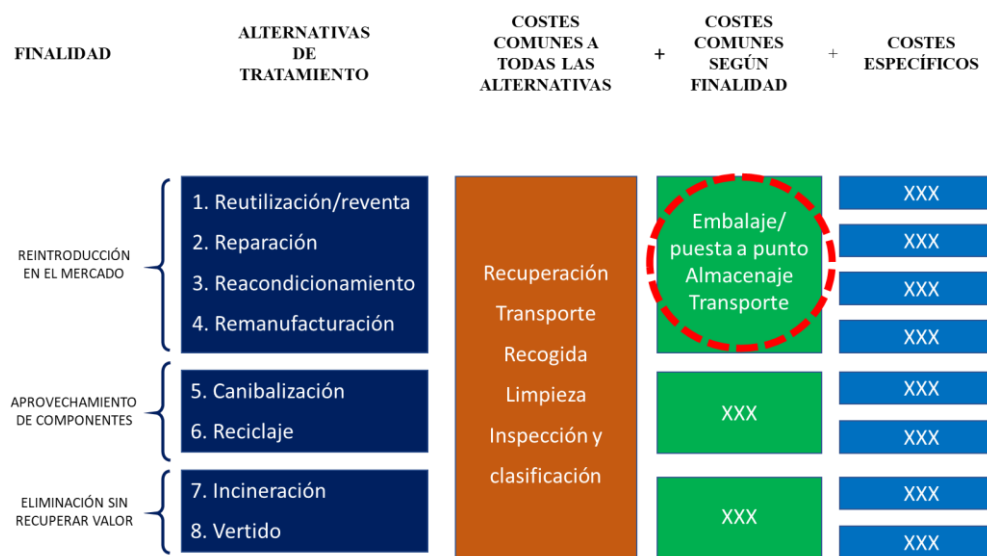
Las alternativas de reutilización, reparación, reacondicionamiento y remanufacturación tienen la finalidad de que el producto completo se reintroduzca en el mercado. Por tanto, las últimas operaciones correspondientes al retorno completo del producto de estas cuatro alternativas llevan unos costes asociados que se muestran a continuación:

**Embalaje/puesta a punto:** Todos los productos que regresen al mercado suelen embalarse de nuevo para protegerlos de cualquier daño durante el almacenamiento o el transporte.

**Almacenaje:** Los productos son almacenados hasta que son adquiridos por un nuevo cliente o trasladados al minorista.

**Transporte:** Esta etapa de transporte corresponde al momento en el que el producto recuperado es vendido o está listo para su reventa y se distribuye al cliente o al minorista. Una vez más, este coste puede ser nulo, cuando sea el propio comprador el que recoja el producto.

A continuación, se muestra la figura de costes referentes a las alternativas de tratamiento con el desglose de los costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado, comentados en este apartado.



**Figura 29.** Costes referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (Elaboración propia)

9.3.1.2.1.2. Costes Comunes para las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes

Cuando un producto recuperado no puede devolverse de nuevo al mercado, pero ciertos componentes individuales del mismo están en condiciones de ser reutilizados directamente o a través de cierta intervención, este producto sigue el proceso de canibalización o reciclaje.

A continuación, se describen los costes comunes para el grupo de alternativas con la finalidad de aprovechar los componentes, como son la canibalización y el reciclaje. Dichos costes, corresponden a los costes asociados a las etapas posteriores de la intervención específica (bien canibalización o bien reciclaje) en cada caso:

**Etiquetado:** Una vez modificado el estado del producto, los componentes son etiquetados con información tal como la fecha de desmontaje, las características actuales y el destino del componente, tratando de aprovechar al máximo los componentes.

**Almacenaje:** Mientras que los productos completos se almacenan para ser adquiridos de nuevo por el cliente, en este caso los componentes son almacenados hasta que se venden o se usan para intervenir sobre otro producto.

**Transporte:** El transporte de los componentes ocurre dentro de la empresa, y es necesario normalmente para trasladarlos al departamento correcto para su reutilización. También es posible vender los diferentes elementos a otras empresas o clientes y que la empresa entregue los componentes, aunque una vez más, dicho coste podría ser nulo si es el nuevo comprador el que se hace cargo del transporte.

A continuación, se muestra la figura de costes referentes a las alternativas de tratamiento con el desglose de los costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes comentados en este apartado.



FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	+ COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD	+ COSTES ESPECÍFICOS
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	1. Reutilización/reventa	Recuperación Transporte Recogida Limpieza Inspección y clasificación	Embalaje/ puesta a punto Almacenaje Transporte	XXX
	2. Reparación			XXX
	3. Reacondicionamiento			XXX
	4. Remanufacturación			XXX
APROVECHAMIENTO DE COMPONENTES	5. Canibalización		Etiquetado Almacenaje Transporte	XXX
	6. Reciclaje			XXX
ELIMINACIÓN SIN RECUPERAR VALOR	7. Incineración		XXX	XXX
	8. Vertido			XXX

**Figura 30.** Costes referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (Elaboración propia)

9.3.1.2.1.3. Costes Comunes para las alternativas con la finalidad de eliminación del producto sin recuperación de valor

Las alternativas cuya finalidad es la eliminación del producto sin recuperación de valor, como son la incineración y el vertido, también tienen operaciones comunes que, por tanto, comprenderían costes comunes para ambas alternativas.

Generalmente, una compañía que elabora productos y maneja productos recuperados o devueltos, no suele contar con las instalaciones específicas para quemar o verter productos de desecho, por lo que existen compañías que están especializadas y tienen las instalaciones apropiadas para realizar una o ambas de estas alternativas.

Antes de que los productos usados, que serán quemados o vertidos, sean llevados a una compañía especializada, primero son almacenados en la empresa, a la espera de acumular una determinada cantidad, para posteriormente ser trasladados hasta la empresa dedicada a la quema o eliminación. Estas etapas suelen llevar asociadas un coste que se describe a continuación:

**Almacenaje:** Después de la etapa de inspección y clasificación, los productos usados que serán incinerados o vertidos son almacenados en una determinada ubicación de la empresa a la espera de que haya suficientes unidades.

**Transporte:** En el momento en el que hay una determinada cantidad de productos acumulados, son trasladados a un especialista que se encargará de la correcta eliminación.

A continuación, se muestra la figura de costes referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor, comentados en este apartado.



**Figura 31.** Costes referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor (Elaboración propia)

Mientras que un especialista maneja los productos usados para su correcta incineración o vertido, la empresa que los envía deberá abonarle los trabajos. En el caso de que sea la misma empresa la que elimine los productos, deberá hacerse cargo de los costes de manipulación. Estos aspectos, se tratarán en la parte relativa a los costes específicos de ambas alternativas.

### 9.3.1.2.2. Costes Específicos

Una vez se han expuesto los costes comunes a las alternativas, el siguiente paso es identificar las etapas específicas de cada alternativa y mostrar los costes asociados de cada una de ellas.

#### 9.3.1.2.2.1. Costes específicos de Reutilización/Reuso

La reutilización directa o la reventa de productos recuperados o devueltos implica volver a vender productos que no se utilizan. Por ejemplo, cuando un cliente compra tres pares de zapatos iguales, pero en distinta talla, en una tienda on-line y envía dos de vuelta, los dos pares de zapatos recuperados se pueden revender. En este sentido, se engloban en este apartado todas aquellas alternativas que reintroducen el producto en el mercado si intervenir sobre él, es decir, ya no solo la reventa o reutilización habitual, sino también la venta en un mercado secundario u outlet, e incluso la donación. En todos estos casos, la principal diferencia a nivel económico vendrá dada por los ingresos que pueda recibir la compañía en contraprestación.

Las opciones para que un producto recuperado vuelva al mercado son (Hazen *et al.*, 2011):

- la empresa puede revender directamente el producto recuperado
- el producto podría distribuirse a otra compañía que lo vendiera
- el producto recuperado podría ser entregado nuevamente al distribuidor o a otra parte de la CdS que almacenara los productos recuperados

Además, en el estudio realizado por Geyer y Doctori Blass,(2010), se investigan detalladamente los costes correspondientes a la reutilización de los teléfonos móviles, los cuales podrían transferirse perfectamente a otro tipo de productos.

Los estudios mencionados anteriormente coinciden en que la suma de las operaciones comunes a todas las alternativas y las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado, componen el proceso completo de reutilización directa, sin necesidad de añadir ninguna operación adicional. De esta forma, no se consideran costes específicos para la alternativa de reutilización o reventa, ya que los costes referentes a la alternativa de reutilización vienen dados por los dos bloques de costes comunes. Por esa razón, la casilla correspondiente a los costes específicos de reutilización aparece vacía en la figura siguiente. La composición de los costes referentes a la alternativa de reutilización se puede apreciar en la figura siguiente:

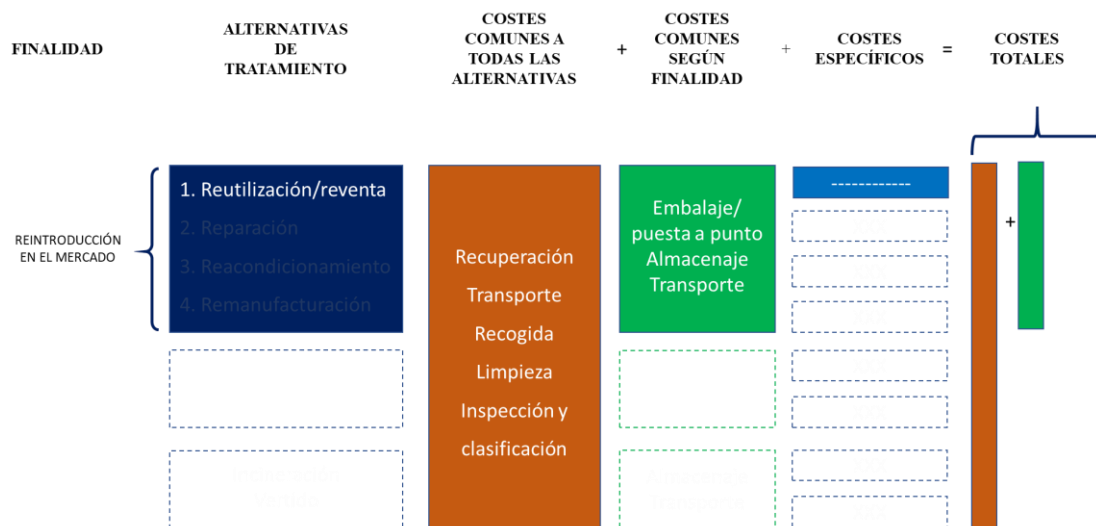


Figura 32. Costes referentes a la alternativa de Reutilización (Elaboración propia)

9.3.1.2.2.2. Costes específicos de Reparación

La reparación involucra la restauración de las partes dañadas y el restablecimiento de piezas que están inservibles o completamente rotas. Generalmente, el estado final o la calidad del producto reparado es inferior en comparación al estado de los productos nuevos.

La descripción de la etapa específica de reparación viene dada en la literatura por la definición de Thierry *et al.* (1995) que define esta etapa como: “Cuando después de la inspección y clasificación, un producto usado necesita ser reparado, se deben identificar las partes rotas. A continuación, las partes a reparar se desmontan del producto (en la medida de lo posible) y se reparan o sustituyen por una pieza nueva. Después de eso, se monta de nuevo el producto y finalmente se realiza una pequeña verificación del correcto estado de este”. **El coste correspondiente a las acciones que componen esa etapa específica constituiría el coste específico de reparación.**

De esta forma, las cinco etapas que podrían generar costes comunes a todas las alternativas (recuperación del producto, transporte, recogida, limpieza e inspección/clasificación) se realizan antes de la etapa específica de reparación y las tres etapas comunes a todas las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (embalaje, almacenaje y transporte), se agregan después. De esta manera, las nueve etapas juntas forman el proceso de reparación como alternativa de LI, tal y como se aprecia en la figura siguiente:

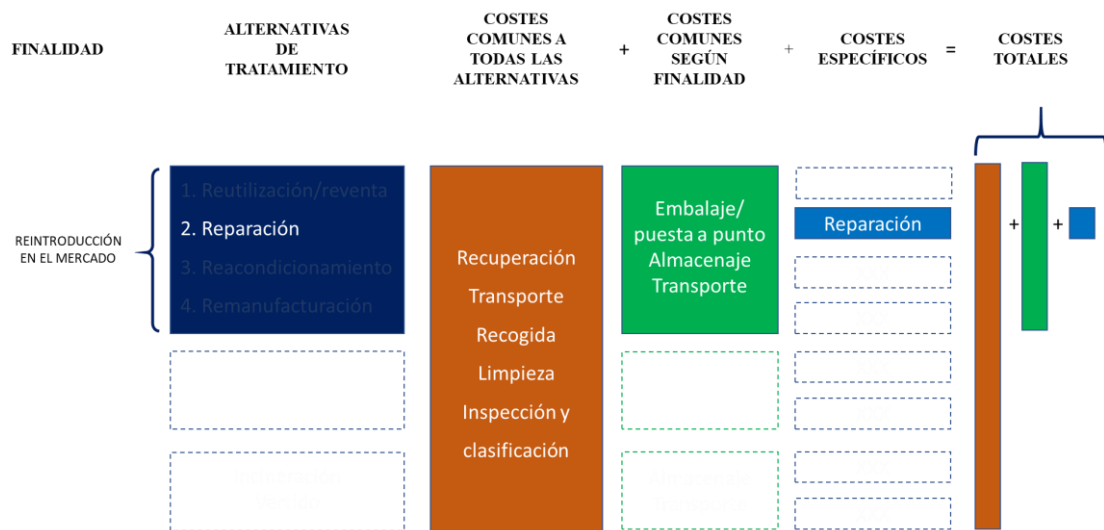


Figura 33. Costes referentes a la alternativa de Reparación (Elaboración propia)

### 9.3.1.2.2.3. Costes específicos de Reacondicionamiento

Cuando se reacondiciona un producto usado, primero se desmonta el producto y después se prueba el funcionamiento de los componentes esenciales, y se reparan o se sustituyen por nuevos componentes cuando procede. La calidad del producto reacondicionado es mayor en comparación con los productos reparados, pero no se puede llegar a etiquetar como “nuevo”. De esta forma, Kusumastuti *et al.* (2004) definieron el reacondicionamiento en la misma línea que lo expuso tiempo antes Thierry *et al.* (1995), destacando la rentabilidad de las operaciones de reacondicionamiento.

Comparado con la alternativa de reparación, el reacondicionamiento difiere solo en los ajustes y mejoras necesarias del producto usado para que sea de mayor calidad.

Las acciones de la etapa de reacondicionamiento se centran en desmontar el producto usado en componentes individuales, inspeccionar el estado de cada elemento crucial en vez de todo el producto, reparar los componentes cruciales que estén rotos o dañados sustituyéndolos por mejores componentes, para finalmente ensamblarlo todo y obtener así el producto usado, pero ahora en un mejor estado. **El coste correspondiente a las acciones que componen esa etapa específica constituiría el coste específico de reacondicionamiento.**

De la misma manera que ocurría en la alternativa de reparación, las cinco etapas comunes a todas las alternativas se realizan antes de la etapa específica de reacondicionamiento y



las acciones que típicamente son parte de la etapa de remanufactura: **recolección, limpieza, separación/desmontaje, reparación o sustitución y montaje.**

Analizando las acciones que, en la literatura consultada, se atribuyen como componentes de la etapa específica de remanufacturación, se puede observar que en la presente tesis se engloban las dos primeras acciones (recolección y limpieza) dentro de las etapas comunes a todas las alternativas. De esta forma, según el trabajo actual, la etapa específica de remanufacturación se iniciaría a partir de la separación/desmontaje del producto.

Según todo lo expuesto anteriormente, **el coste específico de la alternativa de remanufacturación se compondría de los costes referentes a las acciones de separación/desmontaje, reparación o sustitución y montaje.**

Igual que el resto de las alternativas anteriores, las cinco etapas comunes a todas las alternativas se realizan antes de la etapa específica y las tres etapas comunes a todas las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado, se agregan después.

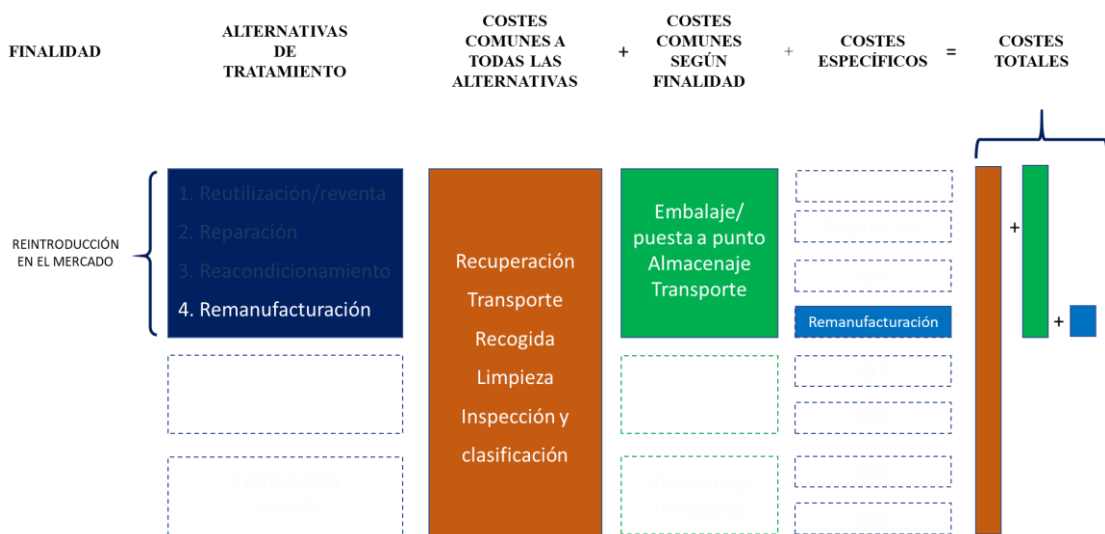


Figura 35. Costes referentes a la alternativa de Remanufacturación (Elaboración propia)

9.3.1.2.2.5. Costes específicos de Canibalización

Mientras que la reparación, el reacondicionamiento y la remanufacturación recuperan el producto usado para ponerlo de nuevo en funcionamiento, la canibalización trata de aprovechar los componentes individuales del producto usado.

Para ello, la primera acción específica de la canibalización será el desmontaje del producto. Una vez que el producto se desmonta, los diferentes componentes se

inspeccionan y se prueban para determinar su calidad. Después de eso, los componentes podrían usarse para reparación, reacondicionamiento, remanufactura, reciclaje o eliminación, dependiendo de la calidad del componente (Ahiska *et al.*, 2013; Kim, 2012; Sasikumar *et al.*, 2010). Esta descripción sigue la línea del trabajo de Thierry *et al.* (1995), en cambio existe otra corriente que define la canibalización como el proceso en el que un producto reparado, reacondicionado, remanufacturado o reciclado elimina un nuevo producto del mismo tipo (Guide y Li, 2010; Kushwaha y Bhattacharya, 2015).

De acuerdo con la definición de Thierry *et al.* (1995), y las alternativas expuestas anteriormente, la etapa específica de canibalización está compuesta por las siguientes acciones:

- desmontaje del producto por completo en componentes individuales
- la prueba de cada componente
- la verificación y la clasificación, según su condición, para su próximo destino, desde la eliminación hasta la reutilización para la remanufactura

El coste correspondiente a las acciones que componen la etapa específica de canibalización constituye el coste específico de canibalización.

Siguiendo la línea de los apartados anteriores, los costes referentes a la alternativa de canibalización están compuestos por los costes comunes a todas las alternativas, los costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes y los costes específicos de la canibalización. En la figura siguiente se aprecia la estructura de los costes comentados:

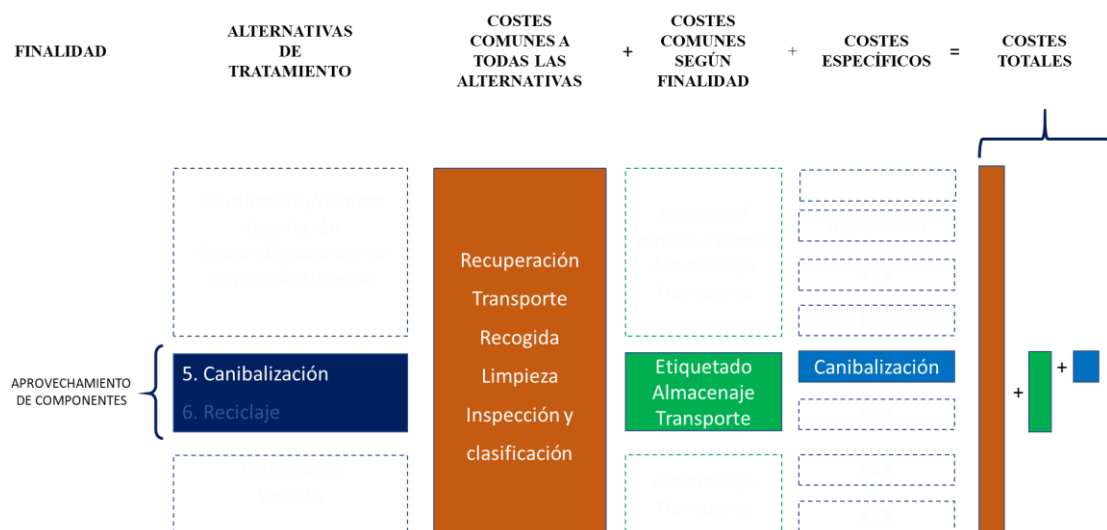


Figura 36. Costes referentes a la alternativa de Canibalización (Elaboración propia)



9.3.1.2.2.6. Costes específicos de Reciclaje

En el caso del reciclaje, los productos recuperados y sus componentes no se mantienen en su formato original, sino que se convierten en materias primas, que formarán la base de fabricación de nuevos productos.

En el trabajo de Keivanpour *et al.* (2014), se muestran cinco acciones diferentes que componen el proceso de reciclaje, junto con los costes asociados a cada una de esas acciones. Estas cinco acciones son: recepción, almacenamiento, desmontaje, trituración y reciclaje, y tratamiento de residuos. En este sentido, Tsai y Hung (2009) también mencionan estas mismas fases en el proceso de reciclaje de residuos electrónicos y eléctricos.

Con estos ejemplos, se podría afirmar que la etapa específica de reciclaje de productos usados contiene una serie de acciones: **Primero, el producto recuperado se desmonta en componentes. En segundo lugar, los componentes son desmantelados en elementos básicos en su forma más pura y finalmente dichos elementos se trituran en partículas menores de manera que los productos finales son materias primas recicladas en su forma más pura.**

Los costes asociados a las diferentes acciones que componen la etapa específica de reciclaje forman los costes específicos del reciclaje. El coste de desmontaje se considera como específico de cada etapa de aprovechamiento de componentes porque, dependiendo de la naturaleza del producto y de la alternativa de disposición, el coste de desmontaje, e incluso el proceso de desmontaje, puede ser bien diferente entre la canibalización y el reciclaje.

Asimismo, los costes referentes a la alternativa de reciclaje están compuestos inicialmente por los costes comunes a todas las alternativas, seguidos por los costes específicos del reciclaje y por último los costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes. En la figura siguiente se aprecia la estructura de los costes comentados:

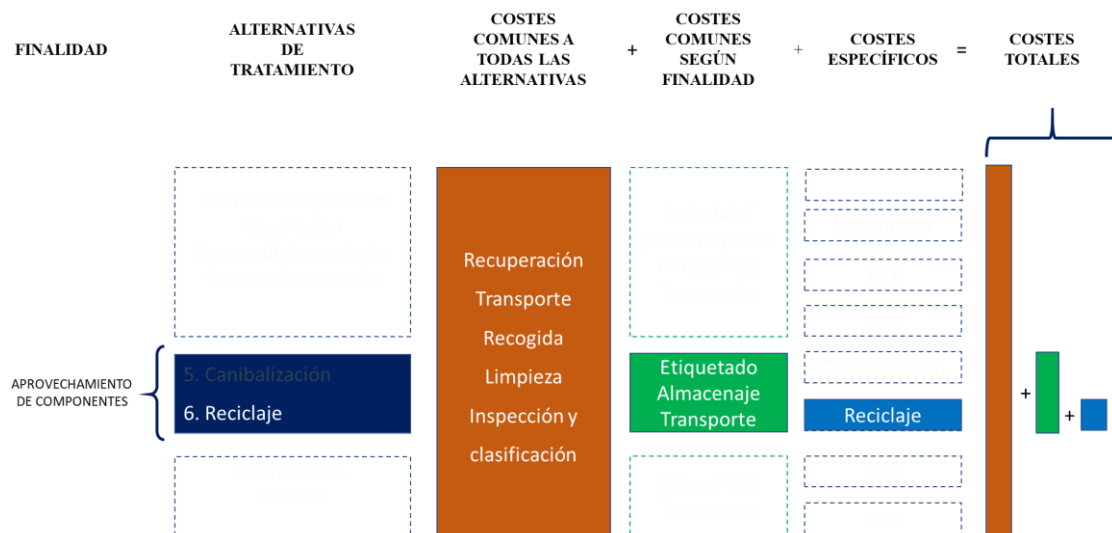


Figura 37. Costes referentes a la alternativa de Reciclaje (Elaboración propia)

#### 9.3.1.2.2.7. Costes específicos de Incineración

Cuando productos usados o sus componentes no pueden ser introducidos de nuevo en el mercado, ni pueden ser utilizados nuevamente para la producción de otros elementos, la alternativa más adecuada puede ser la incineración o eliminación controlada. La elección entre incineración o vertido depende principalmente de la composición del producto usado.

La incineración, como alternativa de LI, tiene ventajas que Stankeric (2016) identifica como: la reducción de la cantidad total de residuos (más del 85%), comparándolo con el impacto de los desechos no tratados, y la posibilidad de generación de energía. Asimismo, también señala una serie de desventajas como son: la contaminación por parte de los restos de ceniza y sólidos, los grandes gastos de inversión y los gases emitidos durante la incineración.

En el trabajo de investigación de Dijkgraaf y Vollebergh (2004) se agrupan los costes de incineración en tres grupos, tales como: **costes privados** que incluyen mano de obra y capital para procesos y mantenimiento; **costes ambientales** referidos a la carga sobre el medio ambiente respecto a la tecnología utilizada y **costes sociales**, que dependen de las características del método utilizado para manejar los desechos. Asimismo, separan las acciones que comprenden la alternativa de incineración en dos etapas:

**Incineración:** En esta etapa, es posible que el producto deba desmontarse primero, cuando no todos sus componentes sean inocuos para el medio ambiente,

por ejemplo. Después de esto, el producto o sus componentes se queman en un incinerador.

**Generación de residuos:** Al quemar el producto o sus componentes, es necesario capturar el calor residual de este proceso para generar energía a partir de este calor. La operación y el control de este proceso deben ser manejados de manera cuidadosa debido al peligro de las altas temperaturas. Además, es necesario hacer un seguimiento de emisiones durante el proceso de combustión, ya que demasiada emisión nociva es perjudicial para el medio ambiente y podría costarle a la empresa dinero adicional por superar la cantidad máxima legal de emisión. Después del proceso de combustión, quedan desechos residuales en forma de cenizas y posibles restos no orgánicos, de manera que la eliminación final de ambos deba realizarse de manera correcta para afectar lo mínimo al medio ambiente.

De esta forma, el coste específico de incineración vendrá dado por el sumatorio de los costes asociados a las acciones que componen las etapas específicas de incineración.

Asimismo, los costes referentes a la alternativa de incineración están compuestos inicialmente por los costes comunes a todas las alternativas, seguidos por los costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto, sin recuperación de valor, y por el coste específico de incineración. En estos casos, el coste específico de la alternativa se incurre al final del proceso. En la figura siguiente, se aprecia la estructura de los costes comentados:

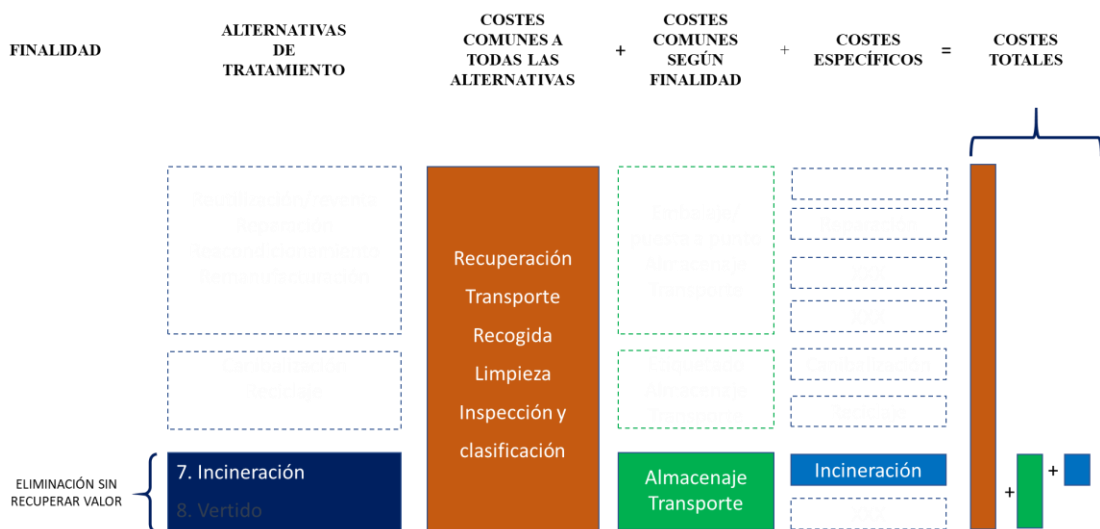


Figura 38. Costes referentes a la alternativa de Incineración (Elaboración propia)

9.3.1.2.2.8. Costes específicos de Vertido

Cuando ninguna de las siete alternativas anteriores es posible, la última solución pasa por enterrar en el suelo los componentes de los productos, cubriéndolos con capas de tierra. Esto se denomina, comúnmente, eliminación del producto por vertido.

El vertido se encuentra en el fondo de la jerarquía de la recuperación de desechos (Kumar y Malegeant 2006), siendo considerado como la peor opción porque consume mucho espacio, corre un alto riesgo de fugas al aire, al agua y al suelo, y se hace menos uso del contenido de energía de los desechos en comparación con la incineración (Dijkgraaf y Vollebergh, 2004; Nabavi-Pelesaraei *et al.*, 2017).

Los costes específicos correspondientes a la etapa de vertido se centran en la disposición del terreno para poder verter los componentes, así como la tecnología necesaria para evitar las fugas y recuperar energía. Además, se contemplan los seguros de mantenimiento después del cierre de las instalaciones e incluso el seguro contra riesgos posterior al mismo.

Siguiendo la misma línea que la alternativa anterior, los costes referentes a la alternativa de vertido están compuestos inicialmente por los costes comunes a todas las alternativas, seguidos por los costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto sin recuperación de valor y por último el coste específico de vertido. En la figura siguiente se aprecia la estructura de los costes comentados.

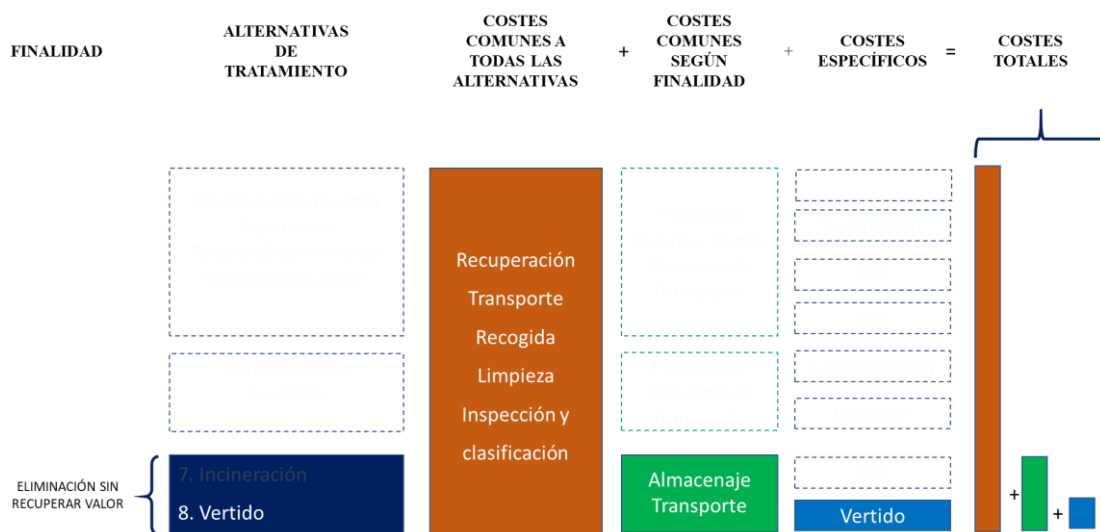


Figura 39. Costes referentes a la alternativa de Vertido (Elaboración propia)

9.3.1.2.3. *Visión general de Costes*

En los apartados anteriores se han expuesto gran cantidad de costes, referentes a las distintas alternativas de disposición. Con la idea de poder resumir los tipos de coste que hacen referencia a las alternativas de LI, se presenta una tabla que ofrece una visión general de costes de todas ellas.

En la tabla siguiente, cada alternativa de disposición ocupa una fila y cada uno de los posibles costes ocupa una columna. Los costes han sido agrupados por costes comunes a todas las alternativas (color marrón), costes comunes según finalidad de las alternativas (color verde) y costes específicos de alternativas (color azul), y ordenados siguiendo el flujo inverso que se suele dar en una CdSI.

Flujo inverso de la CdS ➔

ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS					COSTE ESPECÍFICO	COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD				COSTE ESPECÍFICO
	Recuperación	Transporte	Recogida	Limpieza	Inspección y clasificación		Embalaje	Etiquetado	Almacenaje	Transporte	
1.- Reutilización	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗
2.- Reparación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗
3.- Reacondicionamiento	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗
4.- Remanufacturación	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗
5.- Canibalización	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗
6.- Reciclaje	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗
7.- Incineración	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓
8.- Vertido	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓

**Tabla 12.** Visión general de las alternativas de LI y sus costes correspondientes (Elaboración propia).

Como se puede apreciar en la tabla, existen dos columnas de costes específicos, una colocada en el centro del flujo inverso de la CdS y otra colocada al final, haciendo referencia cada columna a una serie de alternativas diferentes.

La columna de costes específicos colocada en el centro hace referencia a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado (alternativas 2 – 4) y a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (alternativas 5 – 6), las cuales realizan sus operaciones específicas en la parte central del PLI, justo entre las operaciones comunes a todas las alternativas y las operaciones comunes a las alternativas según su finalidad.

En cambio, las alternativas de eliminación del producto sin recuperación de valor (alternativas 7 - 8) realizan las operaciones específicas al final del flujo de operaciones de LI. De esta forma, los costes comunes a todas las alternativas son los primeros que se generan, hasta el momento en el que se aplica el tratamiento específico, en el que se interviene sobre el producto para volver a introducirlo en el mercado o sobre los

componentes para tratar de aprovecharlos. Posteriormente, se realizan las operaciones correspondientes para volver a poner en funcionamiento los productos, a excepción de las dos últimas alternativas (Incineración y Vertido), a las que se aplica en última instancia el tratamiento específico correspondiente a la eliminación del producto.

En este sentido, cada intersección entre filas y columnas será de color blanco (con un check positivo) cuando la alternativa (fila) contemple ese coste (columna) y será de color rojo (con un check negativo) en caso contrario. De esta forma, en el momento que se decide una alternativa de tratamiento de disposición, para cada producto recuperado o devuelto, se incurrirá en los costes de la fila que corresponden a la alternativa seleccionada, de manera secuencial, de izquierda a derecha.

Por ejemplo, en el caso de la **remanufacturación** (alternativa 4), se puede observar cómo los costes a los que se hace referencia son los siguientes (en este orden): recuperación, transporte, recogida, limpieza, inspección y clasificación, coste específico de remanufacturación, embalaje, almacenaje y transporte. No se dan, por lo tanto, los costes de etiquetado ni otro coste específico al final del proceso.

En cambio, para la alternativa de **incineración** (alternativa 7), los costes a los que se hace referencia son (en este orden): recuperación, transporte, recogida, limpieza, inspección y clasificación, almacenaje, transporte y coste específico de incineración. No se dan, por tanto, los costes de embalaje, etiquetado y coste específico del medio del proceso.

### 9.3.2. Aspectos ambientales

El conocimiento y la medición del impacto ambiental de cada una de las alternativas de disposición resulta esencial para escoger la alternativa más conveniente y sostenible y, por lo tanto, para conseguir minimizar el impacto ambiental que se genera con la disposición del producto recuperado.

En base a la revisión realizada de los sistemas de medición ambiental, y siguiendo la idea de que la cuantificación del impacto ambiental sea lo más objetiva posible, se propone realizar una valoración a través de indicadores de estimación, en vez de contar con la opinión de expertos ambientales para que den su valoración. Además de ganar en objetividad, se facilita que el Marco de Referencia que se está diseñando sea utilizable por las empresas, sin precisar de la colaboración de terceros.

Asumiendo que, para el proyecto actual, interesa obtener un único valor de impacto ambiental de cada una de las alternativas de disposición, **se opta por los métodos de punto final**. El punto fuerte de este tipo de métodos de punto final está en la facilidad de agregar todas las categorías de valoración ambiental en un solo indicador, mientras que los métodos de punto intermedio presentan los resultados por categorías (cambio climático, reducción de la capa de ozono, acidificación del medio terrestre, ...)

Tal y como ya se comentó en el apartado 5.3 del estado del arte, los métodos de impacto final más comúnmente utilizados son el Eco-indicador (en sus diferentes versiones 95 y 99) y el método ReCiPe. Asumiendo que ambos métodos pueden ser perfectamente utilizados para el objetivo del presente apartado, **se propone la utilización del método ReCiPe (en su versión más actual de 2016) en vez del Eco-indicador** porque está más actualizado y contiene mayor cantidad y variedad de datos de referencia.

En la presente tesis, el producto a valorar y el origen de este es similar en todas las alternativas, por tanto, **el impacto ambiental de cada alternativa de disposición vendrá dado por la suma del impacto ambiental de las operaciones necesarias para ejecutar cada alternativa de disposición**.

Para ello, se tendrán en cuenta los grupos de clasificación de aspectos de impacto ambiental recogidos en el Eco-indicador y en el ReCiPe (procesos de producción, procesos de transporte, generación de energía y escenarios de eliminación), dejando a un lado el factor correspondiente a los materiales, ya que independientemente de la alternativa aplicada, el material correspondiente al producto recuperado no cambia.

Siguiendo la misma línea que los aspectos económicos, y para facilitar el seguimiento de los aspectos ambientales de cada apartado, se presenta a continuación una figura que muestra por colores los tipos de aspectos ambientales: marrón para los comunes a todas las alternativas, verde para los comunes a las alternativas con la misma finalidad y azul para los aspectos ambientales específicos de cada alternativa.



Figura 40. Estructura de aspectos ambientales para las alternativas de tratamiento (Elaboración propia)

9.3.2.1. Aspectos ambientales comunes

Siguiendo la línea de trabajo expuesta en el apartado correspondiente a los aspectos económicos, las distintas alternativas de disposición comparten las primeras operaciones dentro de la LI, es decir, el periodo desde que el cliente contacta con la empresa para entregar el producto hasta que se toma la decisión de qué hacer con el mismo. Además, según la finalidad de las alternativas de disposición (reintroducción en el mercado, aprovechamiento de componentes o eliminación controlada) también se comparten operaciones entre varias alternativas. Consecuentemente, para mostrar los aspectos ambientales correspondientes a los distintos tratamientos de la LI, se va a diferenciar, por un lado, aquellos aspectos que son comunes a varios tratamientos y, por otro lado, los aspectos ambientales específicos de cada uno de ellos.

9.3.2.1.1. Aspectos ambientales comunes a todas las alternativas

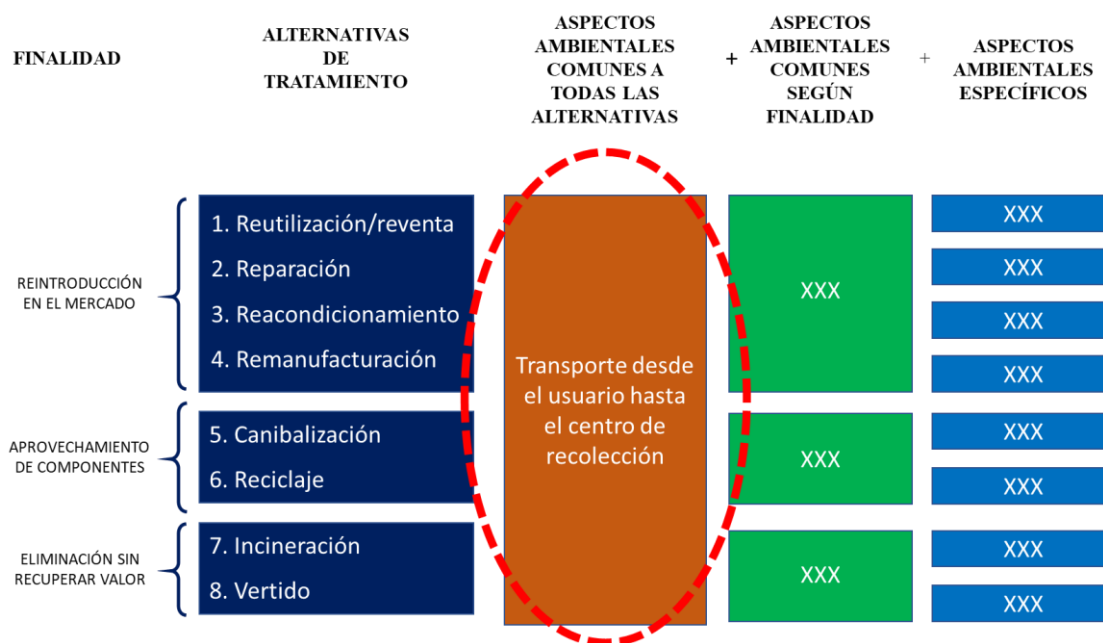
Desde que el producto sale de las manos del cliente hasta que se determina la disposición definitiva a aplicarle, transcurren una serie de pasos que son comunes a todas las posibles alternativas de disposición, ya que ese primer recorrido de inicio de la LI lo realizarán todos los productos por igual. En función de cada escenario, el recorrido podrá prolongarse en menor o mayor medida, pero todas las situaciones contemplarán las operaciones realizadas entre la entrega del cliente y la decisión al respecto del tratamiento a aplicar al producto. En dicho contexto, la principal actividad que generará un impacto



ambiental será la **del proceso de transporte del citado producto, desde que es entregado por el usuario hasta que llega al centro de recolección y se toma la decisión sobre la disposición.**

Dicho proceso de transporte supondrá un impacto ambiental mayor o menor en función del tipo de transporte, la capacidad de este, su densidad de residuos, así como los consumos específicos, incluyendo las emisiones causadas por la extracción y la producción de combustible.

A continuación, se muestra la figura de los aspectos ambientales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos ambientales comunes a todas las alternativas, comentados en este apartado.



**Figura 41.** Aspectos ambientales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos ambientales comunes a todas las alternativas (Elaboración propia)

9.3.2.1.2. *Aspectos ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado*

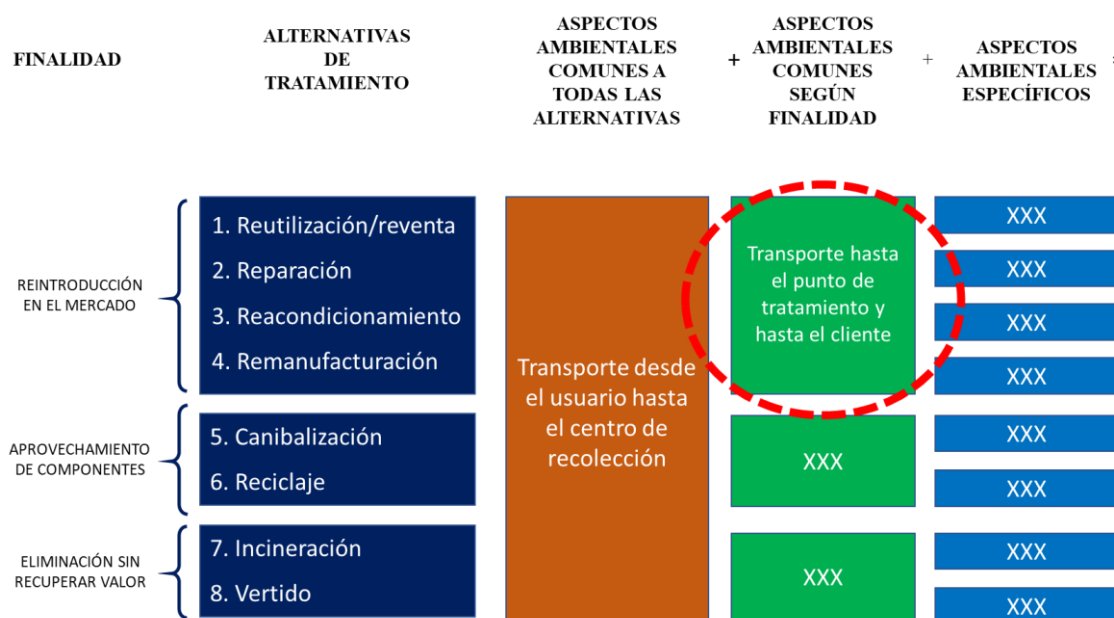
La reintroducción del producto en el mercado se consigue tras poner el producto a disposición del cliente. De esta forma, tanto la alternativa con la finalidad de reintroducir el producto en el mercado sin intervención (reutilización o reventa), como aquellas alternativas destinadas a intervenir sobre el producto para ponerlo de nuevo en el mercado

(reparación, reacondicionamiento y remanufacturación) cuentan con la etapa clave de trasladar el elemento desde el centro de recolección o intervención, hasta el cliente.

Generalmente, el impacto ambiental correspondiente a esa etapa se debe al transporte, por lo que el factor ambiental que contendrán todas aquellas alternativas de disposición que tengan el objetivo de reintroducción en el mercado, tendrán fundamentalmente el impacto ambiental del **transporte de entrega del producto desde la compañía hasta el nuevo cliente**.

Además, las alternativas de disposición que intervienen sobre el producto cuentan también con una etapa en común, para todas ellas, basada en el **transporte desde el centro de recolección y decisión de tratamiento, hasta la zona en la que se interviene sobre el producto** (siempre y cuando sea necesario dicho transporte). En este sentido, también se basa el impacto ambiental, fundamentalmente, sobre el transporte de dicho recorrido.

A continuación, se muestra la figura de los aspectos ambientales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos ambientales comunes a todas las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado, comentados en este apartado.



**Figura 42.** Aspectos ambientales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos ambientales comunes a todas las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (Elaboración propia)

9.3.2.1.3. Aspectos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de los componentes del producto

Para el caso en el que el tratamiento a aplicar sobre el producto esté centrado en el aprovechamiento de los componentes del producto, es decir las alternativas de canibalización o reciclaje, también es frecuente que haya que **desplazar los elementos desde el centro de recolección/decisión hasta el lugar o lugares en los que se le aplique el tratamiento**. Así, dicho transporte marcará también, fundamentalmente, el factor de impacto ambiental que será común a esas alternativas.

A continuación, se muestra la figura de los aspectos ambientales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos ambientales comunes a todas las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, comentados en este apartado.



**Figura 43.** Aspectos ambientales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos ambientales comunes a todas las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (Elaboración propia)

9.3.2.1.4. Aspectos ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto sin recuperación de valor

Al igual que en apartados anteriores, las alternativas destinadas a la correcta eliminación (incineración o vertido) del producto también cuentan con un **transporte para desplazar el elemento desde el centro de recolección o tratamiento hasta la zona de eliminación**.

Dicho transporte, será el que marcará el impacto ambiental que tienen en común ambas alternativas.

A continuación, se muestra la figura de los aspectos ambientales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos ambientales comunes a todas las alternativas con la finalidad de eliminación, comentados en este apartado.



**Figura 44.** Aspectos ambientales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos ambientales comunes a todas las alternativas con la finalidad de eliminación (Elaboración propia)

### 9.3.2.2. Aspectos ambientales específicos

A continuación, se describen los aspectos ambientales específicos para cada alternativa de disposición:

#### 9.3.2.2.1. Aspectos ambientales específicos para la Reutilización/Reuso

Si se determina que un producto es apto para poder ser puesto, de nuevo, a disposición del público, generalmente es porque ya no necesita ninguna intervención o son mínimos los arreglos que precisa (limpieza, etiquetado, empaquetado).

En estos casos, el único impacto destacable sobre el medio ambiente viene dado por el transporte necesario para desplazar el producto hasta el usuario, el cual ya ha sido introducido en apartados anteriores, por lo que no consta ningún factor ambiental específico en estas circunstancias. Por esa razón, la casilla correspondiente a los aspectos

ambientales específicos de reutilización aparece vacía en la figura siguiente, donde se aprecia la estructura de los aspectos ambientales referentes a la alternativa de reutilización/reuso.

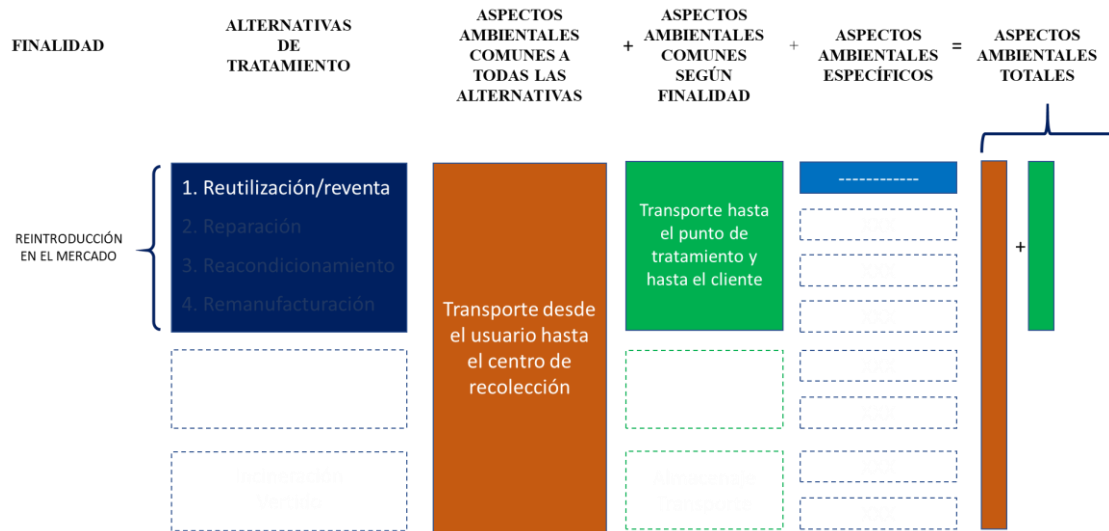
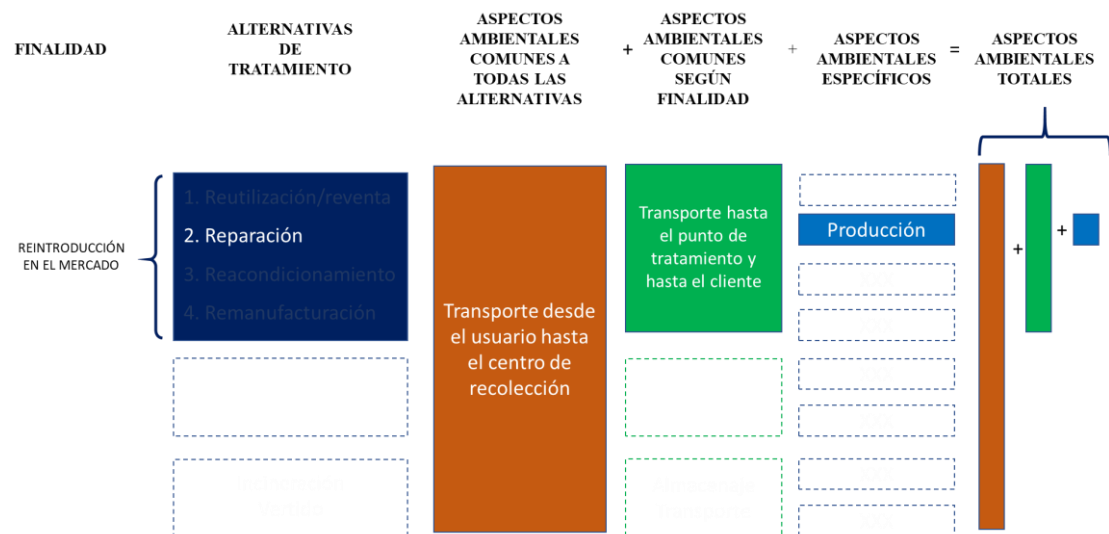


Figura 45. Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Reutilización/Reuso (Elaboración propia)

9.3.2.2.2. Aspectos ambientales específicos para la Reparación

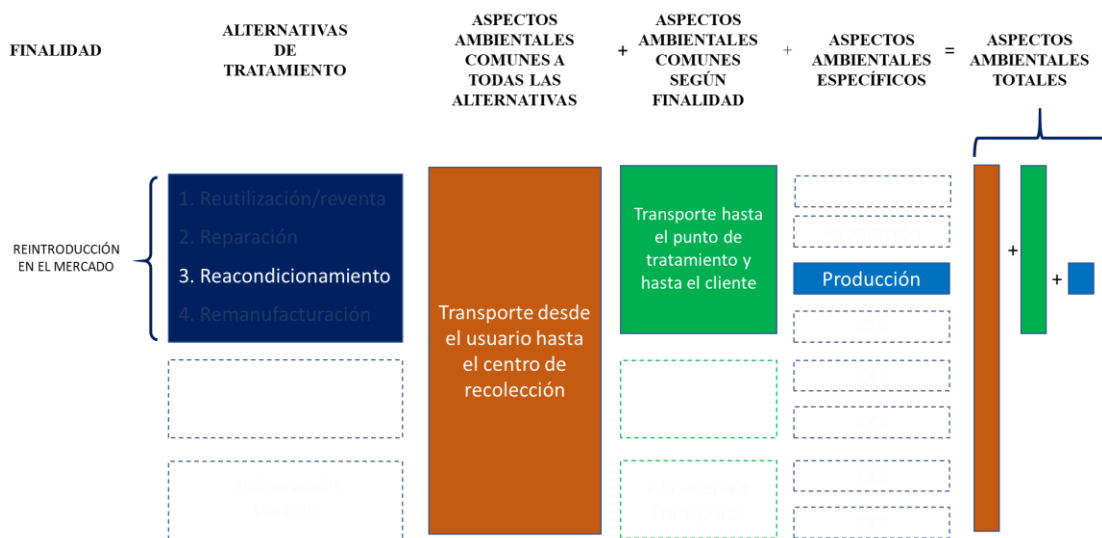
Cuando se realiza una reparación sobre un producto, el impacto ambiental viene determinado básicamente sobre el **proceso de producción o tratamiento** correspondiente. En estos casos, los valores de impacto ambiental se basarán en las emisiones del proceso en sí y en las de los procesos de generación de energía o suministros necesarios para la reparación. En la figura siguiente se aprecia la estructura de los aspectos ambientales referentes a la alternativa de reparación.



**Figura 46.** Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Reparación (Elaboración propia)

9.3.2.2.3. *Aspectos ambientales específicos para el Reacondicionamiento*

Al igual que se indicaba en el apartado anterior, el impacto ambiental correspondiente al **proceso de intervención de reacondicionamiento sobre el producto** se centra en las emisiones y consumos de energía o suministros consecuentes de la intervención sobre el producto. En la figura siguiente se aprecia la estructura de los aspectos ambientales referentes a la alternativa de reacondicionamiento.



**Figura 47.** Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Reacondicionamiento (Elaboración propia)

9.3.2.2.4. *Aspectos ambientales específicos para la Remanufacturaación*

En aquellos casos en los que el producto deba refabricarse de nuevo, habrá que tener en cuenta el **proceso de producción como foco de impacto ambiental**, considerando como factor de impacto todo aquello que suceda mientras que se reelabora el producto.

Asimismo, igual que se mostraba en los apartados anteriores, el impacto ambiental estará basado en las emisiones y consumos de energía o suministros consecuentes de la intervención sobre el producto. En la figura siguiente se aprecia la estructura de los aspectos ambientales referentes a la alternativa de remanufacturaación.

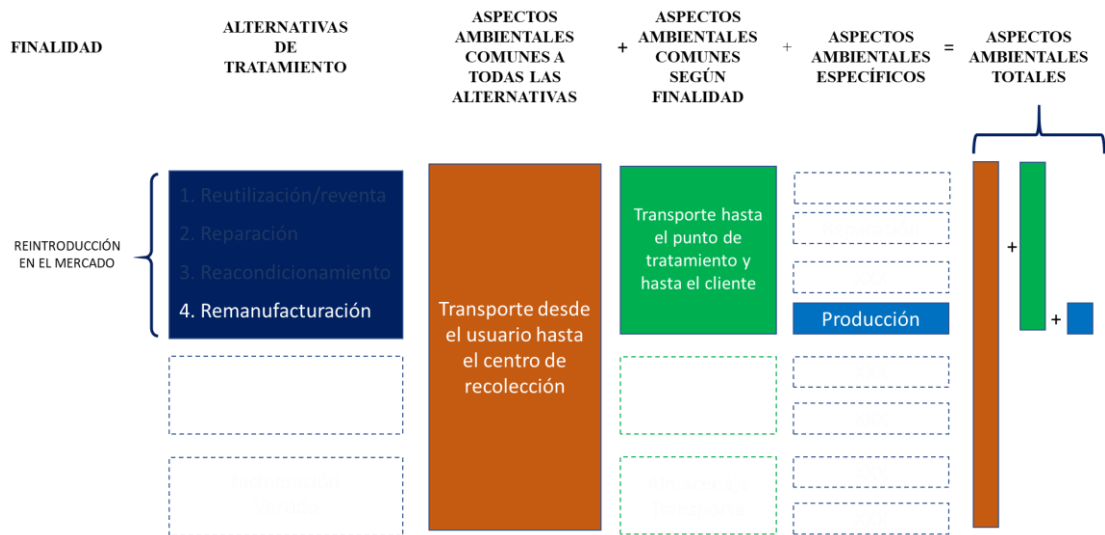


Figura 48. Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Remanufactura (Elaboración propia)

9.3.2.2.5. Aspectos ambientales específicos para la Canibalización

Cuando los productos recuperados son desensamblados para aprovechar los componentes, se realiza una intervención sobre los mismos que marcarán el impacto ambiental correspondiente.

Según el tipo de componente y el tratamiento a realizar, el impacto ambiental será diferente. Dicho impacto ambiental se centra en **el tratamiento aplicado a los diferentes componentes**, basados en el desmontaje, prueba y verificación para poder ser aprovechados posteriormente. En la figura siguiente se aprecia la estructura de los aspectos ambientales referentes a la alternativa de canibalización.

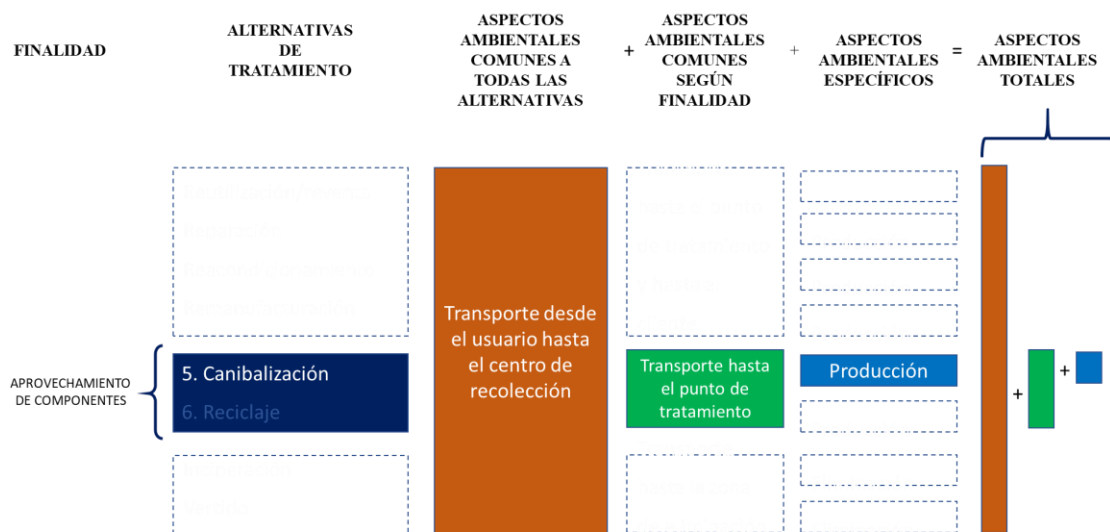


Figura 49. Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Canibalización (Elaboración propia)

9.3.2.2.6. Aspectos ambientales específicos para el reciclaje

Cuando los componentes de los productos recuperados son asignados para ser reciclados, se realiza una intervención sobre los mismos que marcará el impacto ambiental correspondiente.

En función del tipo de componente y de la intervención a realizar, el impacto ambiental será diferente y estará basado en el tratamiento aplicado a cada componente para poder ser aprovechado nuevamente.

El reciclaje siempre tiene un impacto ambiental menor que el vertido o la incineración, ya que trata de aprovechar parte de los componentes del producto para seguir dándole uso. Para ello, el desensamblaje de los elementos, será el primer paso en el reciclaje de los productos, dando paso al tratamiento para reaprovechar la funcionalidad de los mismos (Robinson, 2009). En la figura siguiente se aprecia la estructura de los aspectos ambientales referentes a la alternativa de reciclaje.

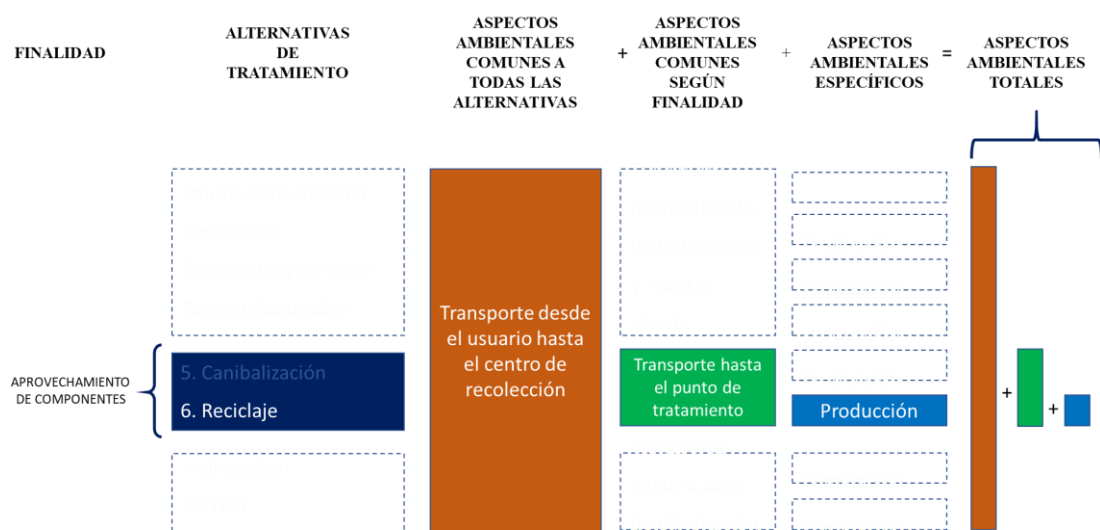


Figura 50. Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Reciclaje (Elaboración propia)

9.3.2.2.7. Aspectos ambientales específicos para la incineración

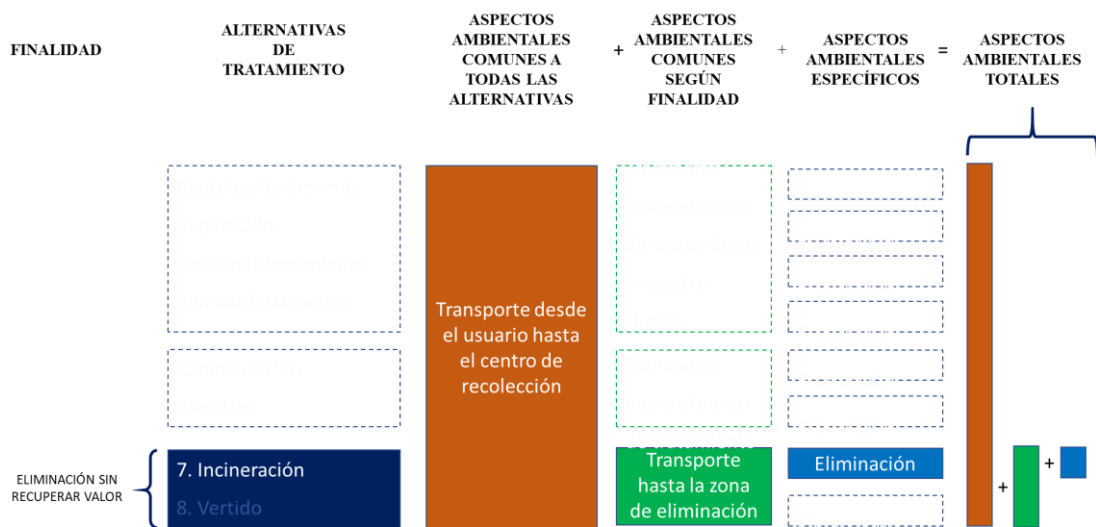
El impacto ambiental generado por la incineración de productos destaca principalmente, de manera negativa, por las emisiones nocivas hacia el medio ambiente que se generan. Asimismo, como algo positivo, se destaca la posible generación de energía relacionada con la quema de productos.



Tradicionalmente, los residuos siempre han sido vertidos, por ser una alternativa barata y fácil, sin contemplar demasiado que, ambientalmente, la alternativa del vertido es mucho más agresiva para el medio ambiente que la incineración.

En este sentido, en el estudio de Assamoi y Lawryshyn, (2012), se comparaba la instalación de incineración con respecto al vertido para el tratamiento de residuos, dando como resultado que la incineración fue mejor para el medio ambiente, pero que, en cambio, el vertido era preferido por sus condiciones económicas.

Al realizar una incineración de los residuos, se produce significativamente mayor cantidad de electricidad en comparación con el vertido. La incineración, por lo tanto, supone una compensación ambiental con respecto al impacto negativo ocasionado por los residuos ambientales fruto de los vertidos. En la figura siguiente se aprecia la estructura de los aspectos ambientales referentes a la alternativa de incineración.



**Figura 51.** Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Incineración (Elaboración propia)

9.3.2.2.8. *Aspectos ambientales específicos para el vertido*

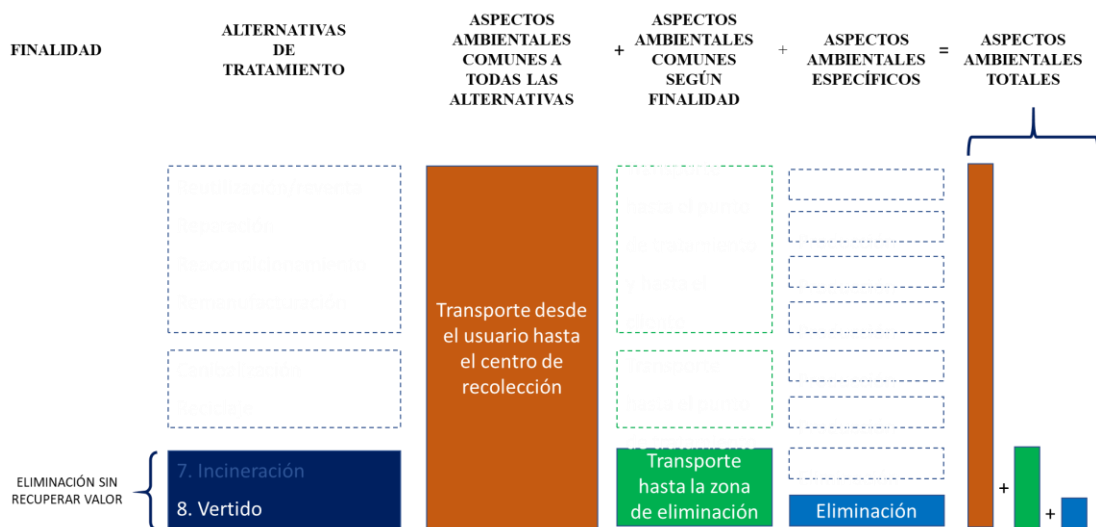
Las principales consecuencias con respecto al medio ambiente que provoca un vertido son la generación de gases y lixiviados. Entendiendo por lixiviado el agua atmosférica que se ha filtrado a través de los desechos y provocando gran contaminación de agua, suelo y aire.

Además de los peligros potenciales para la salud, estas afecciones incluyen incendios y explosiones, daños a la vegetación, mal olor y calentamiento global (El-Fadel, Findikakis,

y Leckie, 1997). Todos estos elementos, son los que componen el **impacto ambiental específico** de esta alternativa de disposición.

Uno de los grandes problemas medioambientales con respecto a los vertidos es la contaminación del agua subterránea. Por tanto, para tratar de reducir los riesgos de contaminación del agua subterránea, es interesante establecer un sistema de recolección, drenaje y tratamiento de lixiviados de vertederos y colocar una capa impermeable con la intención de limitar su infiltración en el terreno (Chofqi *et al.*, 2004).

Especialmente peligroso resulta el vertido de desechos electrónicos, ya que pueden contener mezclas de contaminantes ambientales distintos a otro tipo de desechos y sobretodo por su alto contenido en cobre y plomo (Robinson, 2009). En la figura siguiente se aprecia la estructura de los aspectos ambientales referentes a la alternativa de vertido.



**Figura 52.** Aspectos ambientales referentes a la alternativa de Vertido (Elaboración propia)

### 9.3.2.3. Visión general de impacto ambiental

En la figura siguiente (Figura 53), se muestra la principal actividad de generación de impacto ambiental, según el grupo de clasificación básica del Eco-indicador 99 y ReCiPe 2016 (transporte, producción o eliminación), en cada tramo del PLI.

De esta forma, se puede apreciar cómo, a partir del momento en el que el cliente entrega el producto, la primera operación que genera impacto ambiental es el transporte hasta el centro de decisión. Una vez allí, se genera un nuevo impacto ambiental debido al transporte hacia el lugar donde se ejecute la alternativa de disposición.

En el caso de la reutilización, el impacto ambiental vendría dado por ambos transportes. Para los casos de reintroducción en el mercado con intervención (reparación, reacondicionamiento y remanufacturación), se generará un nuevo impacto ambiental, a parte del transporte hasta el centro de intervención, debido a la intervención sobre el producto y englobada como impacto por producción siendo un impacto específico de cada alternativa. Además, se les contempla a dichas alternativas el impacto ambiental del transporte de reintroducción en el mercado.

Las alternativas enfocadas al aprovechamiento de componentes (canibalización y reciclaje) tienen su impacto ambiental compuesto, además del transporte común a todas las alternativas, por el transporte hasta el centro de tratamiento y el impacto generado por las operaciones de intervención o producción.

Cuando la alternativa de disposición está enfocada en eliminar el producto (incineración y vertido), el impacto ambiental específico vendrá dado por la intervención realizada para la eliminación del producto, a parte del impacto por los transportes correspondientes.

De esta forma, el impacto ambiental a repercutir sobre una determinada alternativa de disposición se obtiene tras cuantificar el impacto ambiental de cada tramo del recorrido desde el cliente hasta la alternativa de disposición en concreto, según se puede apreciar en la figura siguiente (Figura 53):

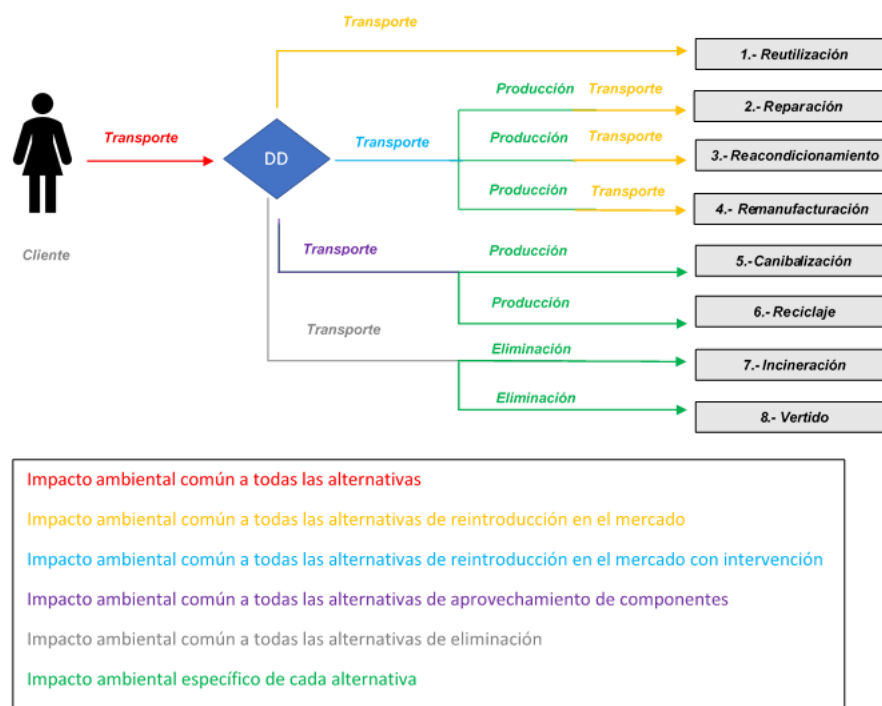


Figura 53. Visión general de composición del impacto ambiental de cada alternativa (Elaboración propia)

### 9.3.3. Aspectos sociales

En la misma línea que en los apartados anteriores, el impacto social de cada alternativa de disposición viene dado por los aspectos sociales de cada operación ejecutada con relación a cada alternativa.

Así como la rentabilidad económica y el impacto ambiental de cada alternativa es relativamente fácil de calcular y, generalmente, su forma de cuantificar está establecida y homogeneizada, el impacto social es más difícil de obtener, debido a que no existen claros marcos de referencia para valorar el impacto social en las operaciones de LI, ni menos aún sobre la DD.

Con el objetivo de proponer una lista de aspectos sociales a considerar en un contexto de LI, más concretamente sobre la DD, y basándose en el listado de aspectos sociales obtenidos en la revisión de la literatura (apartado 5.3.3), se va a proceder a su clasificación por similitud y, una vez agrupados, a la eliminación de repetidos o bien, cuando proceda, a la definición de un aspecto social representativo de cada grupo.

En este sentido, cabe considerar que las empresas socialmente sostenibles aumentan el capital humano de los agentes individuales y mejoran socialmente las comunidades en las que operan. Por tanto, se va a partir de la idea que la dimensión social debe reflejar los efectos internos y externos de la compañía (Halldórsson *et al.*, 2009; Labuschagne *et al.*, 2005). Por ello, una primera forma de agrupar los aspectos sociales identificados es según el tipo de impacto. De esta manera, tendríamos **aspectos que miden el impacto interno y aspectos que miden en impacto externo**. Una vez agrupados los aspectos expuestos en la Tabla 6 en estos dos bloques, eliminados los repetidos y reagrupados los restantes en función de su similitud, se ha obtenido una lista de ocho aspectos sociales; cuatro para evaluar el impacto interno y otros cuatro para el externo.

La Tabla 13 muestra la propuesta de reagrupación de aspectos para la medición del impacto social en el proceso de LI, su frecuencia de aparición en los trabajos consultados y la relación de trabajos que han hecho referencia a cada uno de los aspectos mencionados.

Grupo	Aspectos Sociales	Frecuencia de aparición	Dehghanian y Mansour (2009)	Haldórsson <i>et al.</i> (2009)	Fonseca <i>et al.</i> (2010)	Sarkis <i>et al.</i> (2010)	Pishvaei <i>et al.</i> (2012)	Nikolaou <i>et al.</i> (2013)	Devika <i>et al.</i> (2014)	Ramos <i>et al.</i> (2014)	Ziout <i>et al.</i> (2014)	Govindan <i>et al.</i> (2016)	Feitó-Cespón <i>et al.</i> (2017)	Iacovidou <i>et al.</i> (2017)	Bal y Satoglu (2018)	Chileshe <i>et al.</i> (2018)	Agrawal y Singh (2019)	Dutta <i>et al.</i> (2019)	Gu <i>et al.</i> (2019)	Taleizadeh <i>et al.</i> (2019)	
Impacto Interno	1.- Creación de empleo	61 %	X		X	X	X	X	X			X		X	X			X		X	
	2.- Condiciones de los empleados	61 %	X			X	X	X	X	X		X		X				X	X		X
	3.- Estabilidad laboral	22 %				X		X							X		X				
	4.- Desarrollo profesional y beneficios para empleados	22 %				X		X										X			X
Impacto Externo	5.- Relación con clientes/consumidores	50 %	X				X	X			X		X			X	X		X	X	
	6.- Desarrollo de la sociedad	56 %	X		X	X	X	X			X			X		X	X				X
	7.- Desarrollo socioambiental	6 %		X																	
	8.- Participación de los <i>stakeholders</i>	11 %				X												X			

Tabla 13. Agrupación de aspectos sociales relacionados con la LI (Elaboración propia).

La lista de ocho aspectos propuesta se considera representativa del aspecto social, ya que tiene en cuenta todos los aspectos de la literatura consultada (Tabla 6). Dicho de otra forma, tener en cuenta dichos aspectos en la toma de decisiones sobre LI permitirá alcanzar resultados completamente sostenibles desde un punto de vista social. Ahora bien, una vez identificados los principales aspectos sociales a considerar, surge el gran problema de encontrar indicadores que sirvan para valorar las alternativas de la DD con respecto a dichos aspectos, teniendo en cuenta las siguientes premisas:

- **Deben variar, el valor de medición de dicho indicador, entre las distintas alternativas de disposición a elegir.**
- **Deben ser fácilmente medibles.**
- **Deben ser representativos con respecto al impacto social total generado y representado por los aspectos sociales identificados.**

Precisamente en este sentido, cabe indicar que la revisión de la literatura realizada en el apartado 5.3.3 ya puso de manifiesto la inexistencia de indicadores sociales adecuados para la optimización del diseño de la CdSI, siguiendo las premisas anteriormente expuestas y para cada uno de los aspectos identificados.

Una forma de replantear este asunto para resolver estas carencias es intentar simplificar la lista de aspectos sociales a evaluar, considerando para ello las líneas clave que la Comisión Europea propuso en su agenda para el periodo 2014-2020, respecto a los aspectos sociales. Estas líneas clave son el fomento de:

- **el crecimiento económico,**
- **la promoción del empleo y**
- **el desarrollo regional.**

La línea clave correspondiente al **crecimiento económico** se considera que ya está abordada dentro de los aspectos económicos del modelo expuestos anteriormente. La línea clave referente a la **promoción del empleo** está estrechamente ligada a los aspectos sociales de impacto interno identificados en la Tabla 13. Dentro de dichos aspectos, la creación del empleo es considerado como el más representativo, fácilmente medible y el único que varía sustancialmente entre la aplicación de las distintas alternativas. Con respecto a la línea clave del **desarrollo regional**, el aspecto social de impacto externo que más relación tiene con dicha línea es el desarrollo de la sociedad, siendo además el aspecto con mayor frecuencia de aparición en la literatura consultada.

Por tanto, buscando los aspectos sociales más representativos, fácilmente medibles y que varíen entre las distintas alternativas de disposición, se seleccionan los siguientes aspectos sociales como los más idóneos para valorar el impacto social de las distintas alternativas de disposición: la creación de empleo para cada alternativa de disposición y el desarrollo de la sociedad **donde se llevan a cabo cada una de las alternativas de disposición.**

A continuación, se describen detalladamente cada uno de los aspectos sociales indicados.

- **Creación de empleo:**

Con este aspecto se mide la cantidad de puestos de trabajo que se generan por la elección de una alternativa determinada. Se trata de un aspecto social clave y ampliamente representativo de aquellos que miden el impacto interno de la empresa.

Para facilitar la medición del aspecto social y diferenciar claramente la repercusión de cada alternativa de disposición, se utilizará como indicador el número de **horas**

**de mano de obra necesarias o generadas en cada una de las operaciones relacionadas con cada alternativa de disposición.**

Por ejemplo, si la reparación de un producto precisa de cinco horas de mano de obra mientras una incineración necesita dos horas, en principio sería socialmente más interesante realizar la reparación que la incineración, justamente por su mayor número de horas de mano de obra generadas o necesarias.

- **Desarrollo de la Sociedad:**

Con este aspecto social se pretende medir el impacto de cada alternativa de disposición hacia el exterior de la empresa. El hecho de que las alternativas de disposición a realizar sobre los productos se puedan llevar a cabo en distintas localizaciones, puede repercutir en que las horas de mano de obra necesarias o puestos de trabajo creados puedan tener diferente influencia social en base al factor regional de la zona donde se lleve a cabo la intervención. Por ello, aspectos como la tasa de desempleo, la densidad de población o la distribución de ingresos en la zona de tratamiento, pueden servir como ejemplos de indicadores de dicho factor regional (Mota *et al.*, 2015).

Por ejemplo, si el desempleo es una preocupación importante en el país o la zona a estudiar, se puede aplicar un indicador de desarrollo de la sociedad como factor regional, basado en la tasas de desempleo, para modelizar las horas de mano de obra en función de la ubicación donde se ejecuten.

En este sentido, el factor regional ( $\mu_r$ ) se podría calcular de la siguiente manera:

$$\mu_r = \frac{\textit{Tasa de desempleo de la zona}}{\textit{Tasa de desempleo nacional}}$$

En base a este cálculo, el factor regional podría servir para categorizar el “nivel” de las horas de mano de obra o puestos de trabajo generados por cada alternativa de disposición. De esta forma, partiendo del objetivo de maximización del impacto social, dicho factor regional mediría y ayudaría a promover la creación de puestos de trabajo en regiones con mayores tasas de desempleo.

Por ejemplo, si se tiene la opción de crear un puesto de trabajo por el reciclaje de un producto en Murcia o un puesto de trabajo por la reparación de un producto en Andalucía, el factor regional podría determinar, en igualdad de condiciones, en qué

región sería socialmente más interesante crear un puesto de trabajo y, por tanto, permitiría elegir la alternativa de disposición más idónea.

Así, teniendo en cuenta que la tasa de desempleo media de España, en el primer trimestre de 2020, fue del 14'41% (fuente INE), en Murcia fue del 16'46 % y en Andalucía del 21'21%, generaría mayor impacto social aquella alternativa de disposición que permitiese crear horas de mano de obra en Andalucía ( $\mu_r=1'47$ ) frente a la alternativa que creara las mismas horas en Murcia ( $\mu_r=1'14$ ).

Por tanto, el impacto social de cada alternativa de disposición vendrá dado por el producto de las horas de MO referentes a las operaciones correspondientes a dicha alternativa multiplicadas por el factor regional ( $\mu_r$ ) de la zona donde se realiza cada operación.

Siguiendo la misma línea que los aspectos económicos y ambientales, y para facilitar el seguimiento de los aspectos sociales de cada apartado, se presenta a continuación una figura que muestra por colores los tipos de aspectos sociales: marrón para los comunes a todas las alternativas, verde para los comunes a las alternativas con la misma finalidad y azul para los aspectos sociales específicos de cada alternativa.

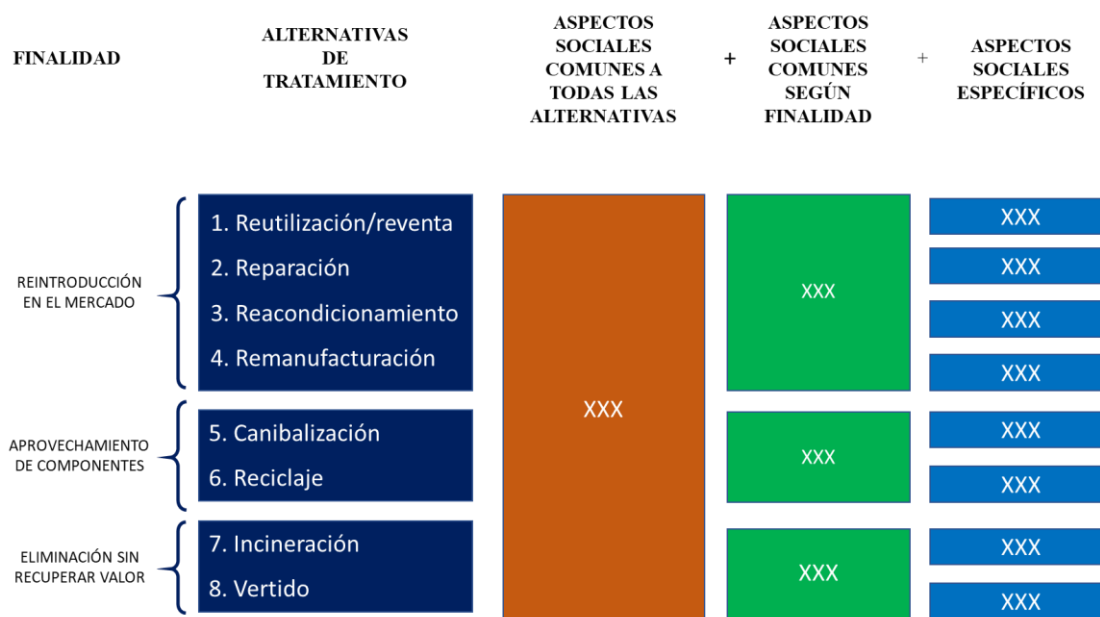


Figura 54. Estructura de aspectos sociales para las alternativas de tratamiento (Elaboración propia)



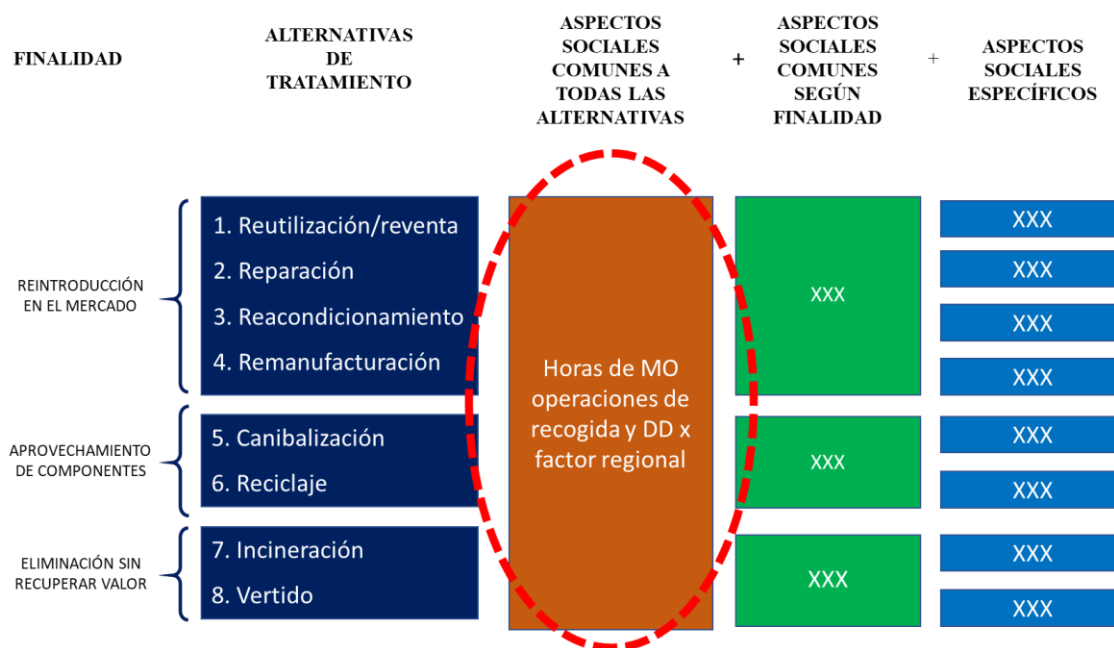
**9.3.3.1. Aspectos sociales comunes**

Siguiendo la línea de trabajo expuesta en los apartados correspondientes a los aspectos económicos y ambientales, las distintas alternativas de disposición tienen aspectos sociales en común a todas ellas y aspectos comunes según la finalidad de las alternativas.

**9.3.3.1.1. Aspectos sociales comunes a todas las alternativas**

Todas las alternativas tienen en común la parte inicial del PLI, concretamente desde que el cliente se pone en contacto con la empresa hasta que el producto llega a las instalaciones de la misma y se toma una decisión sobre la disposición del producto.

La valoración del impacto social vendrá dada por el número de horas de MO generadas en esas operaciones por el factor regional de la zona donde se realice cada operación.



**Figura 55.** Aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos sociales comunes a todas las alternativas (Elaboración propia)

**9.3.3.1.2. Aspectos sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado**

Las alternativas de disposición que tienen la finalidad de reintroducción del producto en el mercado tienen en común las operaciones de transporte desde el centro de decisión hasta el punto de intervención y las operaciones de reintroducción en el mercado (puesta a punto y transporte). En este caso, el impacto social vendrá dado por las horas de MO

destinadas a dichas operaciones por el factor regional de la zona donde se realizan las operaciones.

A continuación, se muestra la figura de los aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos sociales comunes a todas las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado, comentados en este apartado.



**Figura 56.** Aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos sociales comunes a todas las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (Elaboración propia)

9.3.3.1.3. Aspectos sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de los componentes

Las alternativas de disposición que tienen la finalidad de aprovechamiento de los componentes del producto tienen en común las operaciones de traslado desde el centro de recolección/decisión hasta el lugar o lugares donde se aplique el tratamiento correspondiente. En este caso, el impacto social vendrá dado por las horas de MO destinadas a dichas operaciones por el factor regional de la zona donde se realizan las operaciones.

A continuación, se muestra la figura de los aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos sociales comunes a todas las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, comentados en este apartado.

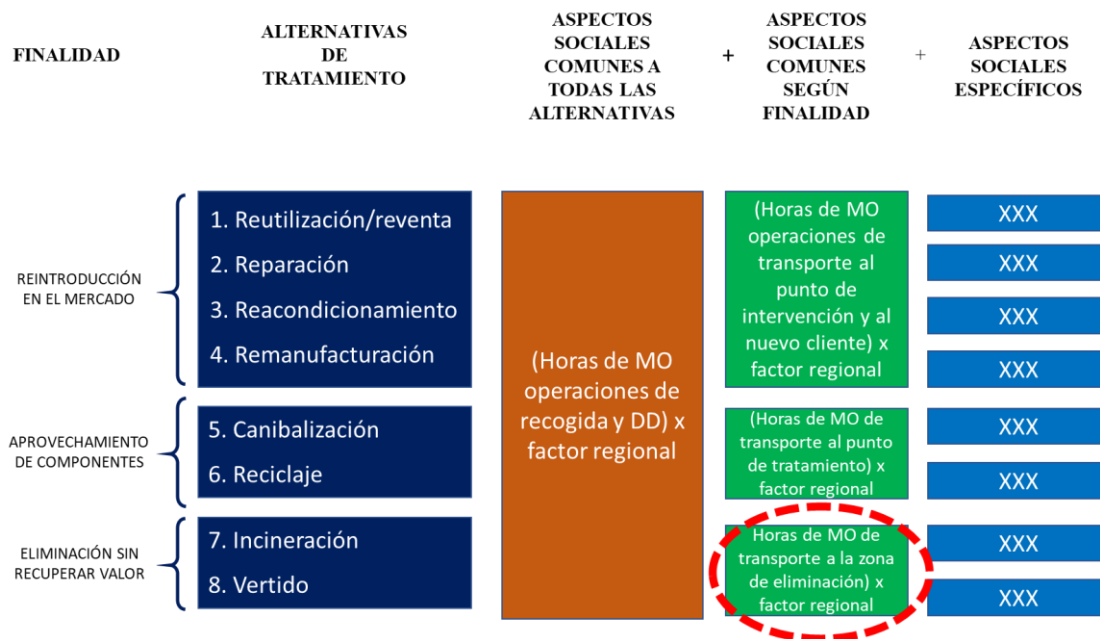


**Figura 57.** Aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos sociales comunes a todas las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (Elaboración propia)

9.3.3.1.4. Aspectos sociales comunes a las alternativas de eliminación del producto sin recuperación de valor

Al igual que en apartados anteriores, las alternativas con la finalidad de eliminación del producto (incineración o vertido) también cuentan con operaciones comunes a todas ellas. En este caso dichas alternativas tienen en común las operaciones de traslado desde el centro de recolección/decisión hasta el lugar o lugares donde se realice la correcta eliminación. Por tanto, el impacto social vendrá dado por las horas de MO destinadas a dichas operaciones por el factor regional de la zona donde se realizan las operaciones.

A continuación, se muestra la figura de los aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos sociales comunes a todas las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor, comentados en este apartado.



**Figura 58.** Aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición con el desglose de los aspectos sociales comunes a todas las alternativas con la finalidad de eliminación (Elaboración propia)

### 9.3.3.2. Aspectos sociales específicos

Los aspectos sociales específicos de cada alternativa de disposición vienen determinados por las operaciones de intervención que se realizan en cada alternativa. De esta forma, se considerará como aspecto social específico, el tiempo de MO destinado a dichas operaciones, modulado por el factor regional de la zona donde se realiza cada operación.

Como se puede apreciar en la figura siguiente (Figura 59) cada alternativa de disposición tiene un aspecto social específico, con la excepción de la alternativa de reutilización, ya que dicha alternativa no tiene asignada ninguna operación específica de intervención.

En resumen, el impacto social de cada alternativa de disposición vendrá dada por los aspectos sociales comunes a todas las alternativas, junto con los aspectos sociales comunes a las alternativas con la misma finalidad y el aspecto social específico, a excepción de la alternativa de reutilización que no cuenta con este último aspecto. Por esta razón, la casilla correspondiente a los aspectos sociales específicos de reutilización aparece vacía en la figura que se muestra a continuación con el desglose de todos los aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición.



Figura 59. Aspectos sociales referentes a las alternativas de disposición (Elaboración propia)

## 9.4. Índices y parámetros

En esta sección se propone un modelo de programación matemática multicriterio, que cuenta con un triple objetivo: maximización de la rentabilidad económica, minimización del impacto ambiental y maximización del beneficio social.

De acuerdo con este triple objetivo, la formulación se presenta de la siguiente manera:

### 9.4.1. Índices

Teniendo en cuenta que, en algunas alternativas de disposición, se actúa sobre el producto en su conjunto y que, en otras, se desmonta el producto para intervenir sobre cada uno de sus componentes, los índices de referencia en el modelo son los siguientes:

- I** índice de productos
- J** índice de componentes

### 9.4.2. Parámetros

En base al apartado anterior (Apartado 9.3), donde se han identificado los aspectos de sostenibilidad a considerar en cada alternativa de disposición, se definen a continuación, los parámetros necesarios para el Modelo Matemático, considerando esos aspectos para las tres dimensiones de la sostenibilidad.

Los aspectos **económicos que afectan** a cada alternativa de disposición se calculan mediante la diferencia entre los ingresos y los costes asociados a cada una de ellas. De esta forma, un resultado positivo significará un superávit o beneficio tras el tratamiento, mientras que un resultado negativo significará un déficit o pérdida.

La métrica de impacto **ambiental** a utilizar es el indicador ecológico de punto final ReCiPe 2016, que es una versión ampliada y mejorada del Eco-indicador 99 y cuenta con una extensa base de datos que puede servir de referencia para comparar ambientalmente el impacto de las diferentes alternativas. Dicho indicador aportará un valor de impacto ambiental de cada operación, de manera que, cuanto mayor sea su valor, mayor será su impacto ambiental. Asimismo, el indicador se expresa en puntos (Pt).

Los parámetros que miden el impacto **social** se basan en una estimación del número de horas de trabajo necesarias para cada operación relacionada con cada alternativa, multiplicadas por el factor que mide el impacto social en la región en donde se llevarán a cabo dichas horas de trabajo (tasa de desempleo, tasas de población, tasa de riqueza...). De esta forma, el impacto social de cada una de las alternativas viene dado por el sumatorio del número de horas de mano de obra necesarias para ejecutar la alternativa ( $w_i$ ), por un determinado factor regional ( $\mu_i$ ).

A continuación, se presentan los parámetros que se proponen para el modelo matemático, organizados según las tres dimensiones de la sostenibilidad.

#### **9.4.2.1. Parámetros Económicos**

Los parámetros correspondientes a los aspectos económicos se plantean siguiendo la estructura de apartado anterior:

- Ingresos obtenidos por reintroducción en el mercado:

**Sreu<sub>i</sub>**            ingresos por reutilización del producto *i*

**Srep<sub>i</sub>**            ingresos por reparación del producto *i*

**Sref<sub>i</sub>**            ingresos por reacondicionamiento del producto *i*

**Srem<sub>i</sub>**            ingresos por remanufacturación del producto *i*

- Ingresos obtenidos por aprovechamiento de componentes:

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>Scan<sub>i,j</sub></b> | ingresos por canibalización del componente <i>j</i> obtenido del producto <i>i</i> |
| <b>Srec<sub>i,j</sub></b> | ingresos por reciclaje del componente <i>j</i> obtenido del producto <i>i</i>      |
| <b>Sbur<sub>i,j</sub></b> | ingresos por incineración del componente <i>j</i> obtenido de producto <i>i</i>    |
- Otros ingresos:

<b>SUB<sub>i,j</sub></b>	ingresos obtenidos por subvención de gestión del componente <i>j</i> obtenido del producto <i>i</i>
--------------------------	---
  - Costes Comunes a todas las alternativas de disposición:

<b>CP<sub>i</sub></b>	coste de recuperación del producto <i>i</i> desde el cliente
<b>CT<sub>1i</sub></b>	coste de transporte del producto <i>i</i> desde el cliente hasta la empresa
<b>COL<sub>i</sub></b>	coste de recogida y almacenaje del producto <i>i</i>
<b>CLE<sub>i</sub></b>	coste de limpieza del producto <i>i</i>
<b>CIS<sub>i</sub></b>	coste de inspección y clasificación del producto <i>i</i>
  - Costes Comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado

<b>COP<sub>i</sub></b>	coste de embalaje del producto <i>i</i> para reutilización o reventa
<b>CS<sub>1i</sub></b>	coste de almacenaje del producto <i>i</i> antes de la reutilización o reventa
<b>CT<sub>2i</sub></b>	coste de transporte del producto <i>i</i> desde la empresa hasta el nuevo cliente
  - Costes Comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes

<b>CL<sub>i,j</sub></b>	coste de etiquetado del componente <i>j</i> del producto <i>i</i> después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización
<b>CS<sub>2i,j</sub></b>	coste de almacenaje del componente <i>j</i> del producto <i>i</i> después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización
<b>CT<sub>3i,j</sub></b>	coste de transporte del componente <i>j</i> del producto <i>i</i> después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización

- Costes Comunes a las alternativas de eliminación del producto sin recuperación de valor

**CS<sub>3i,j</sub>**      coste de almacenaje del componente *j* del producto *i* antes de ser incinerado o vertido

**CT<sub>4i,j</sub>**      coste de transporte del componente *j* del producto *i* antes de ser incinerado o vertido

- Costes específicos de cada alternativa de disposición

**Crep<sub>i</sub>**      coste de reparación del producto *i*

**Cref<sub>i</sub>**      coste de reacondicionamiento del producto *i*

**Crem<sub>i</sub>**      coste de remanufacturación del producto *i*

**Ccan<sub>i,j</sub>**      coste de canibalización del componente *j* del producto *i*

**Crec<sub>i,j</sub>**      coste de reciclaje del componente *j* del producto *i*

**Cbur<sub>i,j</sub>**      coste de incineración del componente *j* del producto *i*

**Crmi<sub>i,j</sub>**      coste de gestión de los residuos del componente *j* del producto *i*

**Cdis<sub>i,j</sub>**      coste de vertido del componente *j* del producto *i*

#### 9.4.2.2. *Parámetros ambientales*

A continuación, se definen los parámetros ambientales propuestos:

- Parámetros ambientales comunes a todas las alternativas:

**EIT<sub>1i</sub>**      impacto ambiental del transporte del producto *i* desde el cliente hasta la empresa

- Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado:

**EIT<sub>2i</sub>**      impacto ambiental del transporte del producto *i* desde la empresa hasta el nuevo cliente

**EIT<sub>3i</sub>**      impacto ambiental del transporte del producto *i* desde el centro de decisión hasta la localización de la intervención

- Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:



**EIT<sub>4i,j</sub>**      impacto ambiental del transporte del componente  $j$  del producto  $i$  desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje o canibalización

- Parámetros ambientales comunes a las alternativas de eliminación del producto sin recuperación de valor:

**EIT<sub>5i,j</sub>**      impacto ambiental del transporte del componente  $j$  del producto  $i$  desde el centro de decisión hasta el centro eliminación por incineración o vertido

- Parámetros ambientales específicos a cada alternativa de disposición:

**EIP<sub>1i</sub>**      impacto ambiental de reparación del producto  $i$

**EIP<sub>2i</sub>**      impacto ambiental de reacondicionamiento del producto  $i$

**EIP<sub>3i</sub>**      impacto ambiental de remanufacturación del producto  $i$

**EIP<sub>4i,j</sub>**      impacto ambiental de canibalización del componente  $j$  del producto  $i$

**EIR<sub>i,j</sub>**      impacto ambiental de reciclaje del componente  $j$  del producto  $i$

**EII<sub>i,j</sub>**      impacto ambiental de incineración del componente  $j$  del producto  $i$

**EIL<sub>i,j</sub>**      impacto ambiental de vertido del componente  $j$  del producto  $i$

#### 9.4.2.3. Parámetros Sociales

A continuación, se definen los parámetros sociales propuestos, divididos en dos tipos: parámetros de tiempo y parámetros de factor regional.

- Parámetros sociales comunes a todas las alternativas:

**W<sub>1i</sub>**      horas de MO de las operaciones de recogida del producto  $i$  desde el cliente hasta la empresa

**μ<sub>1i</sub>**      factor regional de las operaciones de recogida del producto  $i$  desde el cliente hasta la empresa

- Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado:

- |                              |   |
|------------------------------|---|
| <b><math>W_{2i}</math></b>   | horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto $i$ en el mercado   |
| <b><math>\mu_{2i}</math></b> | factor regional de las operaciones de reintroducción del producto $i$ en el mercado   |
| <b><math>W_{3i}</math></b>   | horas de MO de las operaciones de transporte desde el centro de decisión hasta el punto de intervención sobre el producto $i$     |
| <b><math>\mu_{3i}</math></b> | factor regional de las operaciones de transporte desde el centro de decisión hasta el punto de intervención sobre el producto $i$ |
- Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:

<b><math>W_{4i}</math></b>	horas de MO de las operaciones del transporte del componente $j$ del producto $i$ desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje o canibalización
<b><math>\mu_{4i}</math></b>	factor regional de las operaciones del transporte del componente $j$ del producto $i$ desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje o canibalización
  - Parámetros ambientales comunes a las alternativas de eliminación del producto sin recuperación de valor:

<b><math>W_{5i}</math></b>	horas de MO de las operaciones del transporte del componente $j$ del producto $i$ desde el centro de decisión hasta el centro de eliminación por incineración o vertido
<b><math>\mu_{5i}</math></b>	factor regional de las operaciones del transporte del componente $j$ del producto $i$ desde el centro de decisión hasta el centro de eliminación por incineración o vertido
  - Parámetros ambientales específicos a cada alternativa de disposición:

<b><math>W_{rep_i}</math></b>	horas de MO de las operaciones de reparación del producto $i$
<b><math>\mu_{rep_i}</math></b>	factor regional de las operaciones de reparación del producto $i$
<b><math>W_{ref_i}</math></b>	horas de MO de las operaciones de reacondicionamiento del producto $i$

$\mu_{refi}$	factor regional de las operaciones de reacondicionamiento del producto $i$
$W_{remi}$	horas de MO de operaciones de remanufacturación del producto $i$
$\mu_{remi}$	factor regional de las operaciones de remanufacturación del producto $i$
$W_{can_{i,j}}$	horas de MO de operaciones de canibalización del componente $j$ del producto $i$
$\mu_{can_{i,j}}$	factor regional de las operaciones de canibalización del componente $j$ del producto $i$
$W_{rec_{i,j}}$	horas de MO de operaciones de reciclaje del componente $j$ del producto $i$
$\mu_{rec_{i,j}}$	factor regional de las operaciones de reciclaje del componente $j$ del producto $i$
$W_{bur_{i,j}}$	horas de MO de operaciones de incineración del componente $j$ del producto $i$
$\mu_{bur_{i,j}}$	factor regional de las operaciones de incineración del componente $j$ del producto $i$
$W_{dis_{i,j}}$	horas de MO de operaciones de vertido del componente $j$ del producto $i$
$\mu_{dis_{i,j}}$	factor regional de las operaciones de vertido del componente $j$ del producto $i$

### 9.5. Variables de decisión

Las variables de decisión correspondientes al modelo matemático hacen referencia a las distintas alternativas de disposición que existen en la LI. Estas variables, se considerarán como binarias, tomando el valor de 1 cuando una determinada disposición se lleve a cabo y un 0 cuando no. Cabe destacar que las cuatro primeras alternativas (reutilización, reparación, reacondicionamiento y remanufacturación) son aplicables al producto en su conjunto, mientras que las cuatro restantes (canibalización, reciclaje, incineración y vertido) se podrían dar de forma independiente en cada componente del producto, por

ello, si se escoge una de estas cuatro últimas alternativas, habrá que seleccionar una de ellas para cada componente.

Las variables de decisión a considerar son las siguientes:

<b>REU<sub>i</sub></b>	1	si la decisión de disposición del producto <i>i</i> es Reutilizar/revender
	0	en caso contrario
<b>REP<sub>i</sub></b>	1	si la decisión de disposición del producto <i>i</i> es Reparación
	0	en caso contrario
<b>REF<sub>i</sub></b>	1	si la decisión de disposición del producto <i>i</i> es Reacondicionamiento
	0	en caso contrario
<b>REM<sub>i</sub></b>	1	si la decisión de disposición del producto <i>i</i> es Remanufacturación
	0	en caso contrario
<b>CAN<sub>i,j</sub></b>	1	si la decisión de disposición del componente <i>j</i> del producto <i>i</i> es Canibalización
	0	en caso contrario
<b>REC<sub>i,j</sub></b>	1	si la decisión de disposición del componente <i>j</i> del producto <i>i</i> es Reciclaje
	0	en caso contrario
<b>BUR<sub>i,j</sub></b>	1	si la decisión de disposición del componente <i>j</i> del producto <i>i</i> es Incineración
	0	en caso contrario
<b>DIS<sub>i,j</sub></b>	1	si la decisión de disposición del componente <i>j</i> del producto <i>i</i> es Vertido
	0	en caso contrario

## 9.6. Función objetivo

El modelo multi-objetivo engloba los tres objetivos definidos: la maximización de la rentabilidad económica ( $Z_1$ ), la minimización del impacto ambiental ( $Z_2$ ) y la maximización del impacto social ( $Z_3$ ). En esta sección, cada uno de esos objetivos son descritos en detalle:

$$\text{Max } Z_1 = \{ \sum_i [\text{Sreu}_i \text{REU}_i + \text{Srep}_i \text{REP}_i + \text{Sref}_i \text{REF}_i + \text{Srem}_i \text{REM}_i] + \quad (9-1)$$

$$+ \sum_i \sum_j [\text{Scan}_{i,j} \text{CAN}_{i,j} + \text{Srec}_{i,j} \text{REC}_{i,j}] + \quad (9-2)$$

$$+ \sum_i \sum_j [\text{Sbur}_{i,j} \text{BUR}_{i,j}] + \quad (9-3)$$

$$+ \text{SUB}_{i,j} \} - \quad (9-4)$$

$$- \{ \sum_i [ \text{CP}_i + \text{CT}_{1i} + \text{COL}_i + \text{CLE}_{i,j} + \text{CIS}_{i,j} ] + \quad (9-5)$$

$$+ \sum_i [ [ \text{COP}_i + \text{CS}_{1,i} + \text{CT}_{2,i} ] + [ \text{Crep}_i \text{REP}_i + \text{Cref}_i \text{REF}_i + \text{Crem}_i \text{REM}_i ] ] \\ [ \text{REU}_i + \text{REP}_i + \text{REF}_i + \text{REM}_i ] + \quad (9-6)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ [ \text{CL}_{i,j} + \text{CS}_{2i,j} + \text{CT}_{3i,j} ] + [ \text{Ccan}_{i,j} \text{CAN}_{i,j} + \text{Crec}_{i,j} \text{REC}_{i,j} ] ] [ \text{CAN}_{i,j} + \\ + \text{REC}_{i,j} ] + \quad (9-7)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ [ \text{CS}_{3i,j} + \text{CT}_{4i,j} ] + [ (\text{Cbur}_{i,j} + \text{Crm}_{i,j}) \text{BUR}_{i,j} + \text{Cdis}_{i,j} \text{DIS}_{i,j} ] ] [ \text{BUR}_{i,j} + \\ + \text{DIS}_{i,j} ] \} \quad (9-8)$$

$$\text{Min } Z_2 = \sum_i \text{EIT}_{1i} + \quad (9-9)$$

$$+ \sum_i [ \text{EIT}_{2i} + [ \text{EIT}_{3i} (\text{REP}_i + \text{REF}_i + \text{REM}_i) + \text{EIP}_{1i} \text{REP}_i + \text{EIP}_{2i} \text{REF}_i + \\ + \text{EIP}_{3i} \text{REM}_i ] ] [ \text{REU}_i + \text{REP}_i + \text{REF}_i + \text{REM}_i ] + \quad (9-10)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ \text{EIT}_{4i,j} + \text{EIP}_{4i,j} \text{CAN}_{i,j} + \text{EIR}_{i,j} \text{REC}_{i,j} ] [ \text{CAN}_{i,j} + \text{REC}_{i,j} ] + \quad (9-11)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ \text{EIT}_{5i,j} + \text{EII}_{i,j} \text{BUR}_{i,j} + \text{EIL}_{i,j} \text{DIS}_{i,j} ] [ \text{BUR}_{i,j} + \text{DIS}_{i,j} ] \quad (9-12)$$

$$\text{Max } Z_3 = \sum_i (\text{W}_{1i} * \mu_{1i}) + \quad (9-13)$$

$$+ \sum_i [ (\text{W}_{2i} * \mu_{2i}) + [ (\text{W}_{3i} * \mu_{3i}) (\text{REP}_i + \text{REF}_i + \text{REM}_i) + (\text{Wrep}_i * \mu_{repi}) * \\ * \text{REP}_i + (\text{Wref}_i * \mu_{refi}) * \text{REF}_i + (\text{Wrem}_i * \mu_{remi}) * \text{REM}_i ] ] [ \text{REU}_i + \text{REP}_i + \\ + \text{REF}_i + \text{REM}_i ] + \quad (9-14)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ (\text{W}_{4i,j} * \mu_{4i,j}) + (\text{Wcan}_{i,j} * \mu_{can_{i,j}}) * \text{CAN}_{i,j} + (\text{Wrec}_{i,j} * \mu_{rec_{i,j}}) * \text{REC}_{i,j} ] \\ [ \text{CAN}_{i,j} + \text{REC}_{i,j} ] + \quad (9-15)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ (\text{W}_{5i,j} * \mu_{5i,j}) + (\text{Wbur}_{i,j} * \mu_{bur_{i,j}}) * \text{BUR}_{i,j} + + (\text{Wdis}_{i,j} * \mu_{dis_{i,j}}) * \text{DIS}_{i,j} ] \\ [ \text{BUR}_{i,j} + \text{DIS}_{i,j} ] \quad (9-16)$$

El modelo presentado **maximiza la rentabilidad económica** basándose, inicialmente, en los ingresos obtenidos a través de diferentes alternativas de disposición, dependiendo de si se reintroducen en el mercado (9-1), para aprovechar los componentes (9-2) o la

generación de energía a través de incineración (9-3), junto con los posibles ingresos obtenidos por subvenciones (9-4).

A esta serie de ingresos, se deben descontar los costes incurridos de acuerdo con la disposición aplicada, considerando los costes comunes a todas las alternativas (9-5), los costes correspondientes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (9-6), los costes correspondientes a las alternativas de sacar provecho de los componentes (9-7) y los costes asociados con las alternativas de eliminación del producto (9-8).

Asimismo, el modelo busca **minimizar el impacto ambiental** basado en las acciones correspondientes a todas las alternativas de disposición, de acuerdo con el impacto ambiental común a todas las alternativas (9-9), a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (9-10), el impacto correspondiente a las alternativas de aprovechamiento del valor de los componentes (9-11) o la eliminación de los elementos mediante incineración o vertido (9-12).

Además, el modelo pretende **maximizar el impacto social** basado en las acciones correspondientes a todas las alternativas de disposición, de acuerdo con el impacto social común a todas las alternativas (9-13), a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (9-14), el impacto correspondiente a las alternativas de aprovechamiento del valor de los componentes (9-15) o la eliminación de los elementos mediante incineración o vertido (9-16).

### 9.7. Restricciones

Las restricciones del modelo vienen marcadas por las disposiciones aplicables a los productos o a sus componentes, teniendo en cuenta que cada producto o componente solamente puede ser tratado una vez. De esta manera, se separa la única restricción en dos grupos, por un lado, aquellas alternativas referentes a la disposición de productos en su conjunto (reutilización, reparación, reacondicionamiento y remanufacturación) y, por otro lado, aquellas disposiciones referentes a la intervención sobre los componentes (canibalización, reciclaje, incineración y vertido). Así, el modelo matemático queda sujeto a:

$$\sum_{i=1}^I (REU_i + REP_i + REF_i + REM_i + \frac{\sum_{j=1}^J CAN_{ij}}{J} + \frac{\sum_{j=1}^J REC_{ij}}{J} + \frac{\sum_{j=1}^J BUR_{ij}}{J} + \frac{\sum_{j=1}^J DIS_{ij}}{J}) = 1; \forall_{i,j} \quad (9-17)$$

De esta forma, se cumple que cuando el producto se trata sin desmontar tenga sólo una disposición y que, cuando el producto se desensambla en componentes, cada uno de estos tenga una sola disposición también, posiblemente independiente entre ellas.

## 9.8. Conclusiones

En el capítulo 9, se ha propuesto el modelo matemático genérico que servirá de base para la herramienta de ayuda a la toma de decisiones con respecto a la alternativa de disposición a designar para los productos recuperados o devueltos y/o sus componentes.

Inicialmente, se ha definido la problemática a resolver de manera estructurada y orientada al modelado matemático. Posteriormente, se han identificado y descrito los principales aspectos de índole económica, ambiental y social, referentes a cada una de las alternativas de disposición posible. Los aspectos económicos han sido estructurados de manera que primero se han expuesto los ingresos que se pueden percibir según la alternativa escogida y luego los costes que acarrea cada alternativa de disposición. En lo que respecta a los ingresos, se han argumentado aquellos obtenibles para cada una de las alternativas, así como otro tipo de ingresos que se pueden conseguir por la gestión de la LI, como son las subvenciones, por ejemplo. Con respecto a los costes, primero se han mostrado aquellos costes que son comunes a todas las alternativas, luego se han introducido aquellos que son comunes a varias alternativas con ciertas semejanzas y por último se han definido aquellos costes específicos para cada alternativa.

Respecto a los aspectos ambientales, también se han expuesto inicialmente los aspectos comunes a varias alternativas y posteriormente los aspectos específicos a cada una de las mismas. En este sentido, se han agrupado los distintos aspectos ambientales entre aspectos de transporte, de producción o de eliminación, siguiendo la estructura de los grupos de clasificación de aspectos de impacto ambiental recogidos en el Eco-indicador.

En último lugar, cerrando el triple prisma de la sostenibilidad, se han definido los aspectos sociales a valorar en el contexto de la elección del tratamiento de LI. En este sentido, se han elegido dos factores como son la creación de empleo y el desarrollo de la sociedad, porque con ellos se consigue mostrar la importancia de reflejar la influencia interna y externa de las decisiones. Interna porque se valoran las horas de mano de obra creadas, que sería la principal diferencia entre las alternativas, y externa porque se tiene en cuenta el impacto de dichos trabajos sobre la zona en la que se crean.

Una vez definidos los aspectos de sostenibilidad aplicables a cada alternativa de disposición, se han expuesto los diferentes apartados de la definición del modelo matemático. En primer lugar, se han presentados los dos índices a utilizar, uno correspondiente a los productos y otro correspondiente a los componentes. En segundo lugar, se han explicado los parámetros necesarios para el desarrollo del modelo, relacionados con los aspectos económicos, ambientales y sociales anteriormente expuestos. En tercer lugar, se han introducido las variables de decisión binarias, correspondientes a las diferentes alternativas de disposición del producto. Posteriormente, se ha presentado la función objetivo, que engloba la triple dimensión de la sostenibilidad marcando los objetivos de maximización de la rentabilidad económica, la minimización del impacto ambiental y la maximización del impacto social. Finalmente, se ha expuesto la única restricción del modelo que marca la obligatoriedad de escoger un solo tratamiento por producto o por cada uno de los componentes de manera independiente.

## 9.9. Referencias

- Agrawal, S., & Singh, R. K. (2019). Analyzing disposition decisions for sustainable reverse logistics: Triple Bottom Line approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 150, 104448. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104448>
- Ahiska, S., Kurtul, E., Conference, R. K.-I. A., & 2013, U. (2013). Determining the value of product substitution for a stochastic manufacturing/remanufacturing system. *IIE Annual Conference Proceedings*, 3924. *Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE)*.
- Assamoi, B., & Lawryshyn, Y. (2012). The environmental comparison of landfilling vs. incineration of MSW accounting for waste diversion. *Waste Management*, 32(5), 1019–1030. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.023>
- Bal, A., & Satoglu, S. I. (2018). A goal programming model for sustainable reverse logistics operations planning and an application. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1081–1091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.104>
- Chenglin, S., Logistics, Z. X., (2008). Supply planning model for remanufacturing system based on multi-agent technology. *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, 357-361. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4636175/>
- Chileshe, N., Rameezdeen, R., Hosseini, M. R., Martek, I., Li, H. X., & Panjehbashi-Aghdam, P. (2018). Factors driving the implementation of reverse logistics: A quantified model for the construction industry. *Waste Management*, 79, 48–57.



<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.013>

Chofqi, A., Younsi, A., Lhadi, E. K., Mania, J., Mudry, J., & Veron, A. (2004). Environmental impact of an urban landfill on a coastal aquifer (El Jadida, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 39(3–5), 509–516. <https://doi.org/10.1016/J.JAFREARSCI.2004.07.013>

Dehghanian, F., & Mansour, S. (2009). Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(10), 559–570. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2009.04.007>

Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 594–615. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.032>

Dijkgraaf, E., & Vollebergh, H. R. J. (2004). Burn or bury? A social cost comparison of final waste disposal methods. *Ecological Economics*, 50(3–4), 233–247. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2004.03.029>

Dutta, P., Mishra, A., Khandelwal, S., & Katthawala, I. (2019). A multiobjective optimization model for sustainable reverse logistics in Indian E-commerce market. *Journal of Cleaner Production*, 119348. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119348>

El-Fadel, M., Findikakis, A. N., & Leckie, J. O. (1997). Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling. *Journal of Environmental Management*, 50(1), 1–25. <https://doi.org/10.1006/JEMA.1995.0131>

Feitó-Cespón, M., Sarache, W., Piedra-Jimenez, F., & Cespón-Castro, R. (2017). Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertaintyA case study. *Journal of Cleaner Production*, 151, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.057>

Fonseca, M. C., García-Sánchez, Á., Ortega-Mier, M., & Saldanha-da-Gama, F. (2010). A stochastic bi-objective location model for strategic reverse logistics. *Top*, 18(1), 158–184. <https://doi.org/10.1007/s11750-009-0107-2>

Geyer, R., & Blass, V. D. (2010). The economics of cell phone reuse and recycling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5–8), 515–525. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2228-z>

Govindan, K., Paam, P., & Abtahi, A. R. (2016). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological Indicators*, 67, 753–768. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.017>

- Gu, W., Wang, C., Dai, S., Wei, L., & Chiang, I. R. (2019). Optimal strategies for reverse logistics network construction: A multi-criteria decision method for Chinese iron and steel industry. *Resources Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.02.008>
- Guide, V. D. R., & Li, J. (2010). The potential for cannibalization of new products sales by remanufactured products. *Decision Sciences*, 41(3), 547–572. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2010.00280.x>
- Halldórsson, Á., Kotzab, H., & Skjøtt-Larsen, T. (2009). Supply chain management on the crossroad to sustainability: a blessing or a curse? *Logistics Research*, 1(2), 83–94. <https://doi.org/10.1007/s12159-009-0012-y>
- Hazen, B. T., Cegielski, C., & Hanna, J. B. (2011). Diffusion of green supply chain management: Examining perceived quality of green reverse logistics. *International Journal of Logistics Management*, 22(3), 373–389. <https://doi.org/10.1108/09574091111181372>
- Hazen, B. T., Hall, D. J., & Hanna, J. B. (2012). Reverse logistics disposition decision-making: Developing a decision framework via content analysis. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 42(3), 244–274. <https://doi.org/10.1108/09600031211225954>
- Iacovidou, E., Velis, C. A., Purnell, P., Zwirner, O., Brown, A., Hahladakis, J., Williams, P. T. (2017). Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.100>
- Keivanpour, S., Mascle, C., & Kadi, D. (2014). A conceptual framework for value chain analysis of end of life aircraft treatment in the context of sustainable development. *SAE Technical Paper*. Retrieved from <http://papers.sae.org/gsdownload/?prodCd=2014-01-2232>
- Kim, S, S. L.-I. A. C., & 2012, U. (2012). Inventory Control in Hybrid Manufacturing System with Fixed Set-up Costs. *IIE Annual Conference Proceedings*. Retrieved from <http://search.proquest.com/openview/2caefb82bfb1c14915b443560105e0b2/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51908>
- Kumar, S., & Malegeant, P. (2006). Strategic alliance in a closed-loop supply chain, a case of manufacturer and eco-non-profit organization. *Technovation*, 26(10), 1127–1135. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2005.08.002>
- Kushwaha, S., & Bhattacharya, S. (2015). The Impact of Cannibalization on Product Returns for Remanufacturing Under Different Demand Scenarios. *The IUP Journal of Operations Management*, XIV(1), 39–53. Retrieved from

<http://search.proquest.com/openview/7895a965f18dfa06bd27706f7c3db2ff/1?pq-origsite=gscholar&cbl=54466>

- Kusumastuti, R., Piplani, R., & Lim, G. H. (2004). An approach to design reverse logistics networks for product recovery. *2004 IEEE International Engineering Management Conference 3*, 1239–1243. <https://doi.org/10.1109/IEMC.2004.1408892>
- Labuschagne, C., Brent, A. C., & Erck, Ron P G, V. (2005). Assessing the sustainability performances of industries. *Journal of Cleaner Production*, *13*(4), 373–385. [https://doi.org/10.1016/S1574-0714\(06\)01001-3](https://doi.org/10.1016/S1574-0714(06)01001-3)
- Lalmazlounian, M., Abdul-Kader, W., & Ahmadi, M. (2014). A Simulation Model of Economic Production and Remanufacturing System Under Uncertainty. *Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference*, 3211. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Morteza\\_Lalmazlounian/publication/287597664\\_A\\_simulation\\_model\\_of\\_economic\\_production\\_and\\_remanufacturing\\_system\\_under\\_uncertainty/links/572c9bfc08ae88d4a32d6484/A-simulation-model-of-economic-production-and-remanufact](https://www.researchgate.net/profile/Morteza_Lalmazlounian/publication/287597664_A_simulation_model_of_economic_production_and_remanufacturing_system_under_uncertainty/links/572c9bfc08ae88d4a32d6484/A-simulation-model-of-economic-production-and-remanufact)
- Li, J., González, M., & Zhu, Y. (2009). A hybrid simulation optimization method for production planning of dedicated remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, *117*(2), 286–301. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.11.005>
- Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., & Barbosa-Povoa, A. P. (2015). Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning. *Journal of Cleaner Production*, *105*, 14–27. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.07.052>
- Nabavi-Pelesaraei, A., Bayat, R., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Afrasyabi, H., & Chau, K. wing. (2017). Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for incineration and landfill systems of municipal solid waste management - A case study in Tehran Metropolis of Iran. *Journal of Cleaner Production*, *148*, 427–440. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.172>
- Nikolaou, I. E., Evangelinos, K. I., & Allan, S. (2013). A reverse logistics social responsibility evaluation framework based on the triple bottom line approach. *Journal of Cleaner Production*, *56*, 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.009>
- Ortegon, K., Nies, L. F., & Sutherland, J. W. (2013). Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, *39*, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.022>
- Pishvae, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially

- responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 206, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2012.04.010>
- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2014). Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns. *Omega*, 48, 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.11.006>
- Robinson, B. H. (2009). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 408(2), 183–191. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2009.09.044>
- Sarkis, J., Helms, M. M., & Hervani, A. A. (2010). Reverse logistics and social sustainability. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 17(6), 337–354. <https://doi.org/10.1002/csr.220>
- Sasikumar, P., Kannan, G., & Haq, A. N. (2010). A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery—a case of truck tire remanufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9-12), 1223 - 1234. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-009-2470-4>
- Stankeric, O. (2016). Comparative Analysis of Reverse Logistics Activities and Incineration for Greening Waste Management. *Doctoral dissertation. University of Zagreb. Faculty of Transport and Traffic Sciences*. <https://zir.nsk.hr/islandora/object/fpz%3A643>
- Taleizadeh, A. A., Haghghi, F., & Niaki, S. T. A. (2019). Modeling and solving a sustainable closed loop supply chain problem with pricing decisions and discounts on returned products. *Journal of Cleaner Production*, 207, 163–181. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.198>
- Thierry, Martijn and Salomon, Marc and Nunen, Jo Van and Wassenhove, L. Van. (1995). Strategic issues in product recovery management. *Long Range Planning*, 28(3), 120. [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(95\)91628-8](https://doi.org/10.1016/0024-6301(95)91628-8)
- Tsai, W.-H., & Hung, S.-J. (2009). Treatment and recycling system optimisation with activity-based costing in WEEE reverse logistics management: an environmental supply chain perspective. *International Journal of Production Research*, 47(19), 5391–5420. <https://doi.org/10.1080/00207540801927183>
- Verdad, L. (2019). El oscuro y desconocido negocio de devolver las compras por internet | *La Verdad*. Retrieved October 4, 2019, from <https://www.laverdad.es/sociedad/compras-vuelta-20190205114915-ntvo.html>

Ziout, A., Azab, A., & Atwan, M. (2014). A holistic approach for decision on selection of end-of-life products recovery options. *Journal of Cleaner Production*, 65, 497–516.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.001>

**Capítulo 10. Bloque II – Herramienta  
Matemática Genérica: Proceso de  
solución**

## 10.1. Introducción

El modelo matemático propuesto en el capítulo anterior sirve de herramienta para mejorar la eficiencia en la ayuda a la toma de decisiones de disposición del producto. Asimismo, contiene una triple función objetivo que permite encontrar la mejor decisión considerando simultáneamente las tres dimensiones de la sostenibilidad: económica, ambiental y social.

La dificultad en la resolución del modelo matemático reside en que estos objetivos de sostenibilidad a optimizar no están alineados y entran en conflicto: dos objetivos tratan de maximizar la rentabilidad económica y el impacto social, y un tercero trata de minimizar el impacto ambiental, de forma que cuando se intenta maximizar el impacto social o económico, se maximiza también el impacto ambiental, empeorándolo. Por ejemplo, la alternativa del vertido suele ser económicamente más ventajosa que la incineración, en cambio, su impacto ambiental es mucho mayor. Otro ejemplo se aprecia entre la reventa en un mercado secundario y el reacondicionamiento. Mientras la segunda alternativa aporta un resultado económico mayor, la primera alternativa ofrece menor rentabilidad económica.

Este triple objetivo, fuerza a desarrollar un proceso de solución basado en la optimización multi-objetivo, sin descartar ningún objetivo de la sostenibilidad. Un modelo matemático con una función mono-objetivo se podría resolver mediante una herramienta informática, seguramente con un solo paso de ejecución del modelo. En cambio, este tipo de modelos multi-objetivo necesitan un proceso de solución adicional para obtener la solución más adecuada.

El **objetivo del presente capítulo** es precisamente explicar el funcionamiento del proceso de solución que, junto al modelo matemático propuesto en el capítulo anterior, componen la herramienta matemática diseñada para ayudar en la toma de decisiones sobre la disposición de los productos.

En la figura siguiente (Figura 60) se destaca mediante un rectángulo rojo el ámbito del Marco de Referencia que se va a trabajar en el capítulo:

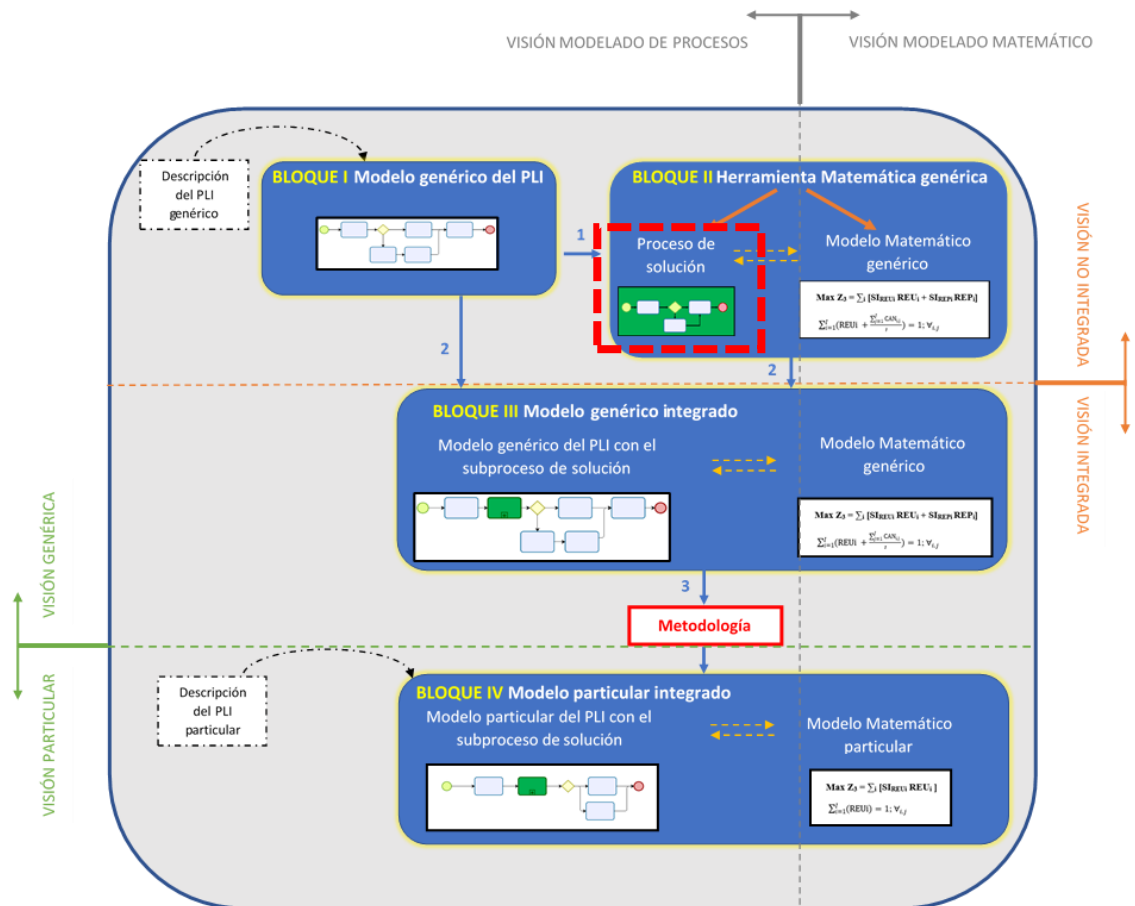


Figura 60. Ámbito de trabajo del capítulo sobre el Marco de Referencia propuesto (Elaboración Propia)

La justificación y el desarrollo del proceso de solución se muestra en la sección 10.2. En ella se justifica el método de resolución a utilizar y se detalla el proceso de solución a seguir para encontrar la mejor alternativa. Por último, en la sección 10.3 se incluyen las principales conclusiones del presente capítulo.

## 10.2. Proceso de solución multi-objetivo

Actualmente, desde el punto de vista de las decisiones, se está avanzando para equilibrar la importancia que se le concede a los objetivos económicos, ambientales y sociales. **De esta forma, la mejor alternativa de disposición determinada por un sistema de decisión multi-objetivo, debería ser ambientalmente sostenible, económicamente viable y socialmente aceptable** (Emery *et al.*, 2007).

El modelo matemático planteado ofrece una alternativa para cada perspectiva de su función objetivo, de manera que ofrece la mejor solución desde el punto de vista económico, desde el punto de vista ambiental y desde el punto de vista social.



Evidentemente, en el caso de que estas tres soluciones coincidieran en la misma alternativa de disposición, esa misma alternativa sería la más adecuada desde todas las perspectivas.

El problema surge cuando las soluciones aportadas para los diferentes objetivos no convergen en una misma alternativa, debido al conflicto entre las dimensiones consideradas, como se ha comentado anteriormente. Esto ocurre en la gran mayoría de casos, conduciendo a la aplicación una solución de optimización multi-objetivo (MOO – *Multi-objective Optimization*).

El resumen del funcionamiento del modelo matemático se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 61):

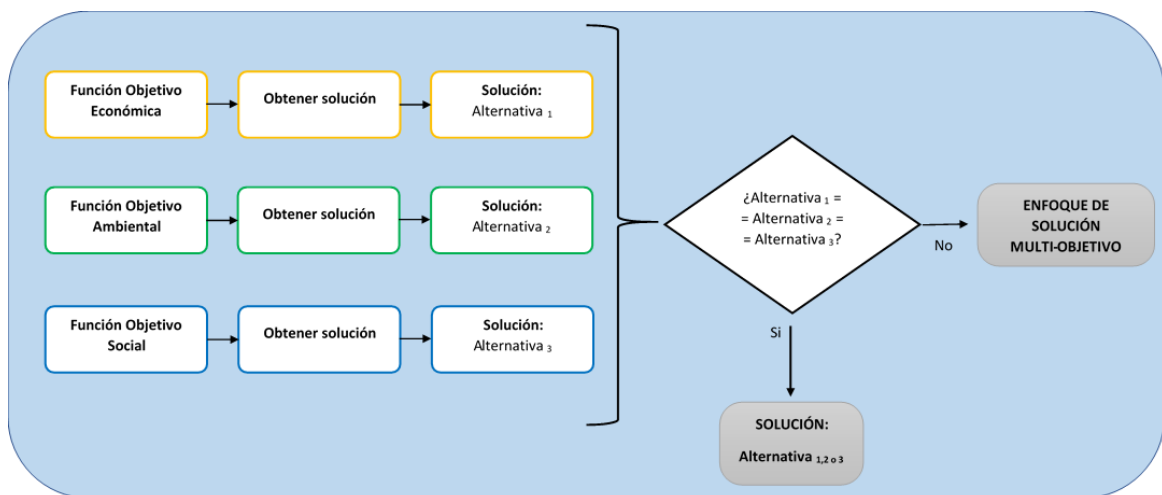


Figura 61. Funcionamiento del Modelo Matemático (Elaboración propia)

A continuación, se justifica el método de resolución de problemas multi-objetivo a utilizar para la herramienta propuesta en la tesis.

### 10.2.1. Métodos de resolución a utilizar: Programación por compromiso – Suma ponderada.

En cada función objetivo, la mejor alternativa de solución aportará un valor óptimo en su dimensión correspondiente. Los valores óptimos de cada función objetivo determinarían un **punto ideal** (tridimensional), sirviendo como punto ideal a conseguir por parte de los decisores.

Debido a que, se espera que la alternativa de solución óptima de cada dimensión no coincida con las otras dos, la mejor solución será elegir aquella alternativa cuyos valores de las tres funciones objetivo, determinen el punto que más se aproxime al punto ideal.

En base a las **técnicas de solución A-Priori** para la MOO, como **la programación por compromiso** (apartado 5.3.4), donde las preferencias de los decisores son establecidas al inicio del proceso, el grado de aproximación de cada alternativa de solución con respecto al punto ideal vendrá dado por la distancia entre el valor de la alternativa y el punto ideal en cada objetivo. En este caso, puesto que existen funciones a maximizar y a minimizar, se normalizarán los valores mediante su valor absoluto a través de la siguiente expresión:

$$d_j = \frac{|f_j(x) - f_j^*|}{|f_j^*|} \quad (10-1)$$

Donde  $f_j(x)$  es el valor a analizar y  $f_j^*$  es el valor ideal del objetivo j-ésimo (el mejor valor de ese objetivo).

En este sistema, el valor normalizado será 0 cuando el objetivo alcance el mejor valor y será mayor a medida que se aleje de la solución ideal. Por tanto, cuanto más cerca esté de 0, mejor será el valor.

Así mismo, los distintos objetivos que componen el modelo matemático del presente trabajo pueden tener diferente grado de importancia para los decisores, siendo muy probable que las preferencias de los decisores varíen y se vean modificadas una vez se hayan obtenido un grupo de soluciones. Por ello, y dando cabida a un mayor espectro de situaciones, se considera necesario que el método de resolución que se utilice contemple **técnicas A-Posteriori**, permitiendo graduar el peso de cada objetivo y priorizar entre ellos en función de cada situación.

Una posibilidad es utilizar la ponderación entre los diferentes objetivos a través de técnicas como la **suma ponderada**. Dicha técnica, se basa en sumar todas las funciones objetivo, utilizando un coeficiente de peso para cada una de ellas, pasando de ser multi-objetivo a mono-objetivo. El planteamiento quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^n w_j f_j(x) \quad (10-2)$$

Donde  $w_j \geq 0$ ,  $j = 1, \dots, n$ ; son los coeficientes de peso o ponderación que representan la importancia relativa de cada uno de los objetivos  $f_j(x)$  y la suma de los  $w_j$  es igual a la unidad.

Por tanto, teniendo en cuenta las **características de ponderación y normalización**, una vez definidos los grados de aproximación de cada función objetivo ( $d_j$ ), se agregarán los tres objetivos que intervienen en este problema. Para ello, se representarán mediante  $W_j$  los pesos relativos a cada una de las funciones objetivo. De esta forma, el problema de optimización quedará de la siguiente manera:

$$\text{Min } \sum_{j=1}^3 W_j \left[ \frac{|f_j(x) - f_j^*|}{|f_j^*|} \right] \quad (10-3)$$

En base a esta fórmula, se procederá a obtener los valores de las tres funciones objetivo ( $f_j(x)$ ) para cada una de las posibles alternativas de disposición planteadas y, posteriormente, se ordenará de menor a mayor el resultado de la agregación de valores, según se indica en la fórmula (10-3).

Una vez clasificadas las alternativas, y en vista de los resultados, el decisor puede determinar la opción más adecuada para sus intereses.

### 10.2.2. Proceso de solución a seguir

El paso previo al proceso de solución que determina la alternativa más adecuada para el producto recuperado o devuelto será la recogida de datos correspondientes a las distintas alternativas.

En este sentido, se recabarán los **datos referentes a los aspectos económicos** (ingresos y gastos) correspondientes a cada posible alternativa para cada producto y cada uno de sus componentes. Posteriormente, se recogerá la información, sobre el **impacto ambiental** correspondiente a cada alternativa. Por último, habrá que disponer también de los datos referentes al **impacto social** de cada una de las alternativas también. Con toda esta información, la manera de proceder para obtener la mejor solución se expone a continuación:

1. A través del software de optimización matemática MPL, en su versión 5.0.8 de 32 bit para Windows, se obtendrá el valor óptimo para cada una de las tres funciones

objetivo. Cada valor óptimo estará determinado a través de una alternativa concreta de disposición. De esta forma, se obtendrán 3 alternativas de disposición ideales (y generalmente diferentes), una para cada objetivo, obteniendo un punto ideal óptimo compuesto por los tres valores óptimos.

2. Se plantearán todas las posibles alternativas de solución, de manera que para cada una de ellas se calculará su valor en cada objetivo (económico, ambiental y social).
3. Se determinará el nivel de importancia para cada uno de los objetivos (peso) mediante tres valores porcentuales que sumarán el 100%.
4. Se calculará el grado de aproximación de cada alternativa con respecto al punto ideal óptimo establecido en el primer paso (según los valores de las alternativas de solución y la importancia de cada objetivo).
5. Se seleccionará aquella alternativa que más se aproxime al punto óptimo ideal como alternativa más adecuada.

En la figura siguiente (Figura 62) se presenta un esquema con el proceso de solución a seguir:

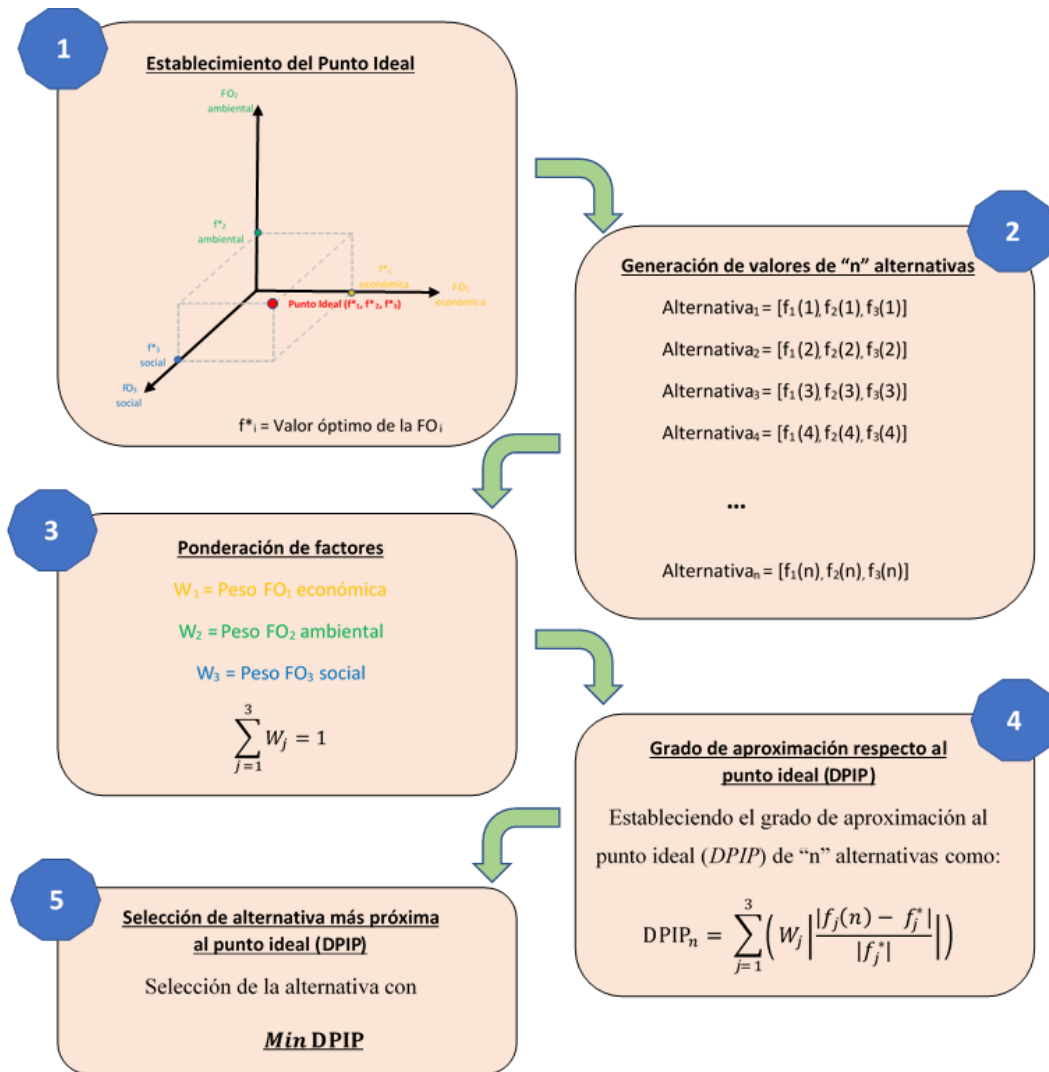
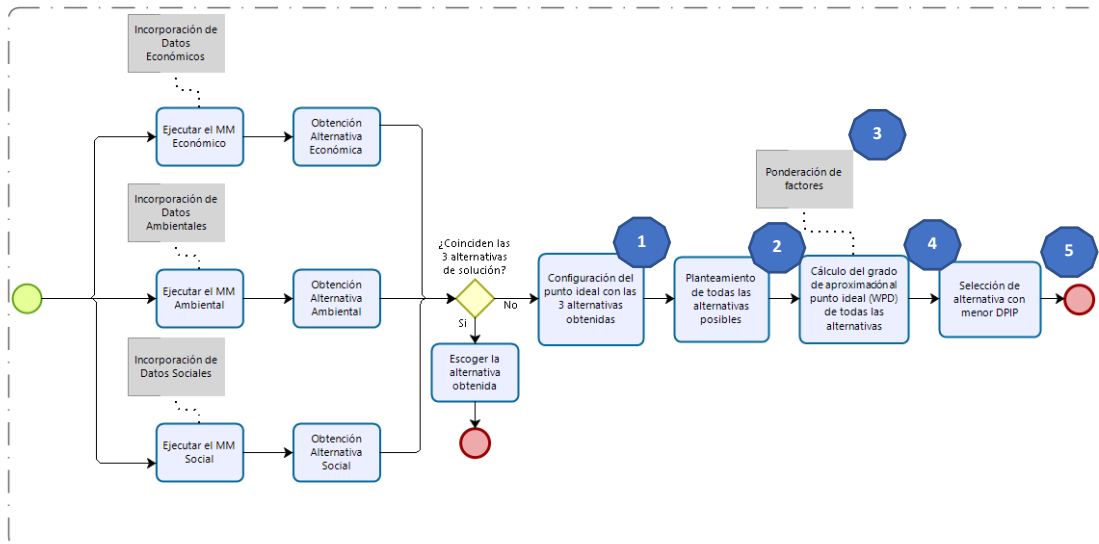


Figura 62. Esquema de los pasos del Proceso de solución a seguir (Elaboración propia)

A continuación, se muestra un modelo de este mismo proceso de solución utilizando el lenguaje de modelado de BPMN. Se ha incluido la numeración del esquema para que se pueda entender mejor la correspondencia entre ambos.



**Figura 63.** Modelo del proceso de solución a seguir utilizando el lenguaje de modelado BPMN (Elaboración propia)

### 10.3. Conclusiones

En este capítulo 10 se expone el proceso de solución a seguir para poder obtener la alternativa más adecuada, utilizando el modelo matemático propuesto.

Este capítulo ha servido, junto al capítulo anterior en el que se mostraba el modelo matemático genérico, para definir la propuesta de herramienta matemática genérica de ayuda a la toma de decisiones para la elección de la mejor alternativa de disposición en el ámbito de la LI.

Dentro del ámbito de la MOO en el que se encuadra este trabajo, se argumentan los métodos de resolución a utilizar, teniendo clara la necesidad de normalización y ponderación en estos. En esta línea, se justifican los métodos de programación por compromiso y suma ponderada como métodos de resolución a utilizar para el problema abordado en esta tesis.

El proceso a seguir para obtener la alternativa de disposición más adecuada para cada caso consta de cinco pasos: establecimiento del punto ideal, generación de valores de las alternativas, ponderación de factores, cálculo del grado de aproximación respecto al punto ideal y selección de la alternativa más adecuada.

En el capítulo siguiente, se va a completar la exposición sobre la herramienta matemática genérica, mostrando los requerimientos (tanto materiales como de datos) para ejecutar la herramienta y validando el funcionamiento de la misma.

#### **10.4. Referencias**

Emery, A. *et al.* (2007). Environmental and economic modelling: A case study of municipal solid waste management scenarios in Wales. *Resources, Conservation and Recycling. Elsevier*, 49(3), 244–263. doi: 10.1016/J.RESCONREC.2006.03.016.

**Capítulo 11. Bloque II – Herramienta  
Matemática Genérica: Validación  
mediante experimentación.**



### 11.1. Introducción

En el presente capítulo se detallan una serie de pasos para validar la herramienta matemática genérica propuesta. Para ello, se experimentará sobre el modelo matemático genérico y sobre el proceso de solución diseñado, ya que la validación de ambos aspectos resulta esencial en la presente tesis. El principal objetivo del capítulo es, por lo tanto, la comprobación de que ambos funcionan correctamente y se comportan de manera lógica en todas las situaciones posibles.

En la figura siguiente (Figura 64) se destaca mediante un rectángulo rojo el ámbito del Marco de Referencia que se trata en el presente capítulo:

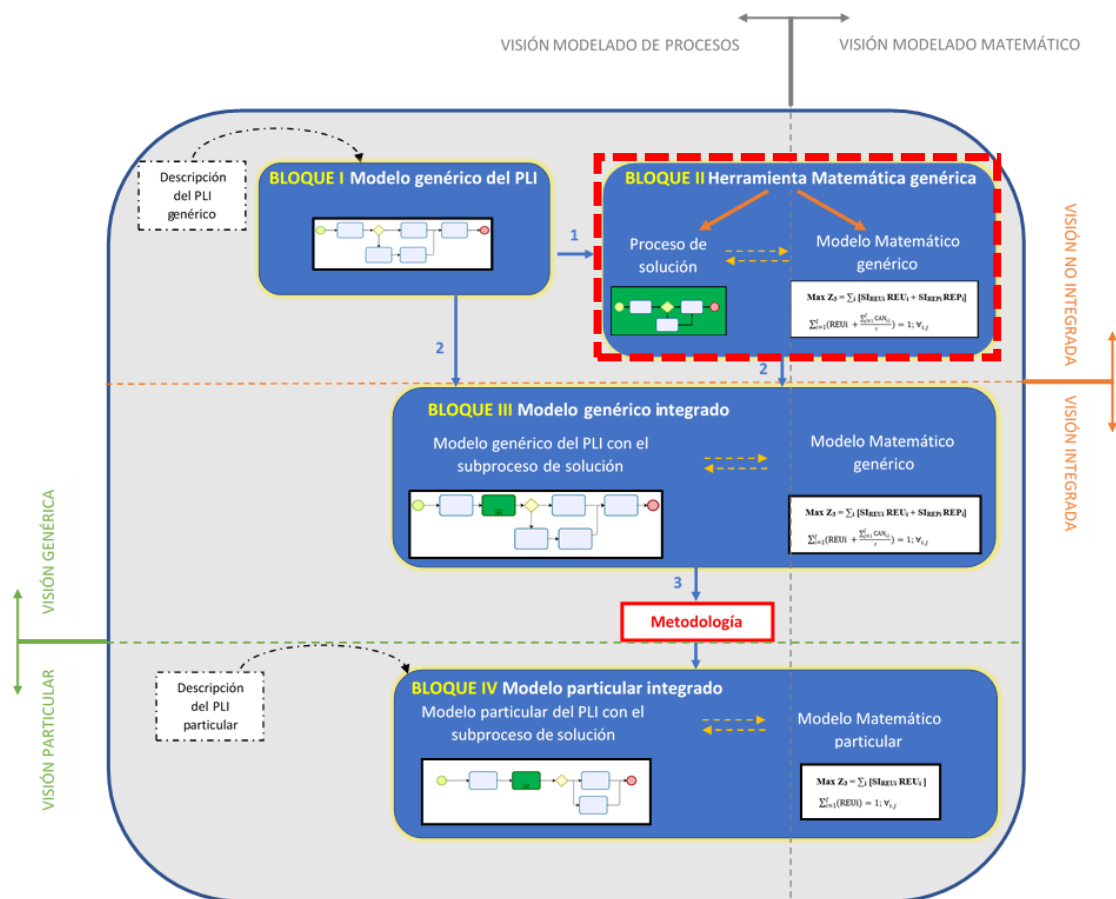


Figura 64. Ámbito de trabajo del capítulo sobre el Marco de Referencia propuesto (Elaboración Propia)

Con la idea de conseguir el objetivo planteado, se indica en la sección 11.2 los requerimientos de software y hardware necesarios para aplicar la herramienta. Posteriormente, se indica cómo obtener los valores necesarios para la estimación de la rentabilidad económica, del impacto ambiental y del impacto social.

En la sección 11.3, se llevará a cabo la experimentación sobre la herramienta. Mediante una batería de valores económicos, ambientales y sociales se comprobará cómo se selecciona la mejor alternativa en cada momento, mostrando así el correcto funcionamiento de la herramienta en distintos escenarios.

Por último, la sección 11.4 ofrece las principales conclusiones obtenidas en la presente experimentación.

## **11.2. Requerimientos necesarios para aplicar la herramienta**

### **11.2.1. Requerimientos de software y hardware, implantación y aplicación de la herramienta.**

Pensando en que el número de usuarios de la herramienta puedan ser los mayores posible, se ha procurado que los requerimientos tecnológicos necesarios para la aplicación de la misma sean económicos y de fácil acceso.

En primer lugar, se precisará de una hoja de cálculo para estimar los valores económicos y, posteriormente, desarrollar el proceso de solución. En este sentido, el software **Excel de Microsoft** resulta una herramienta muy adecuada.

Por otra parte, la experimentación con el modelo matemático ha sido realizada con el **software MPL**, en su versión 5.0. Dicho programa ofrece una versión gratuita que es suficiente para poder ejecutar el modelo matemático diseñado. Además, se utilizarán bases de datos (BBDD) de **Microsoft Access** para introducir los datos necesarios al modelo, gracias a la conexión que ofrece el software MPL para captar los datos desde Access.

Además de los programas comentados, faltaría por tener en cuenta un programa que permitiese el cálculo del impacto ambiental. En este caso, como se justifica en el siguiente apartado, se utiliza el software **OpenLCA**, que cubre las necesidades de la presente tesis y tiene la ventaja de ser un programa libre y gratuito.

De esta forma, se han utilizado dos programas gratuitos junto con una hoja de cálculo y una base de datos que son programas que se utilizan ampliamente, tanto a nivel académico como profesional.

Evidentemente, la herramienta propuesta puede ser utilizada mediante otros programas que permitan las mismas funciones que los comentados. Asimismo, según los requerimientos de uso de los programas mencionados, se puede afirmar que las necesidades de hardware no son excesivas, pues con ordenadores con un microprocesador Intel-core i3 es suficiente para su correcta ejecución.

### 11.2.2. Estimación de la rentabilidad económica, impacto ambiental y social

La entrada fundamental de datos para poder utilizar la herramienta propuesta, son los valores sobre la rentabilidad económica, el impacto ambiental y el social, correspondientes a las acciones de cada una de las posibles alternativas. A continuación, se explica cómo conseguir dichos valores.

- **Rentabilidad Económica.** Los aspectos **económicos que afectan** a cada alternativa se obtienen en base a los ingresos y los costes asociados a cada una de las mismas. Los ingresos provienen de los productos a los que se les aplica cierta intervención y se venden tras volver a salir al mercado. Los costes surgen al aplicarle cualquier disposición al producto y minoran los ingresos obtenidos. Estos costes, tal y como se ha expuesto en capítulos anteriores, están relacionados mayoritariamente con procesos de transporte, producción, almacenamiento y producción, y se deben valorar para cada alternativa. Asimismo, se cuantifican los ingresos que se generarían por sacar al mercado cada uno de los objetos o componentes, tras cada disposición, a través del precio de venta o a través de la comparativa de precios de mercado de productos con características comunes. De esta forma, un resultado positivo significará un superávit o beneficio tras la disposición, mientras que un resultado negativo significará un déficit o pérdida.
- **Impacto Ambiental.** La literatura sobre las CdS verdes es muy amplia y se han propuesto varios métodos y marcos de trabajo para evaluar el impacto ambiental (apartado 5.3.2). De todos los métodos propuestos, la evaluación del Ciclo de Vida (LCA) se ha descrito como el método científico más fiable, hoy en día, para estudiar y evaluar el impacto ambiental de un producto o proceso (Ness *et al.*, 2007; Mota *et al.*, 2015). Actualmente, para poder gestionar con agilidad las grandes cantidades de datos que hacen referencia al impacto ambiental y que puedan ser utilizados a través de los métodos de análisis LCA, se han desarrollado

una amplia variedad de herramientas software que integran y facilitan el manejo de dicha información. Todas las herramientas tienen como componentes principales y prioritarios una variedad de BBDD y de metodologías distintas de aplicación para el cálculo del impacto ambiental, cada cual con un enfoque propio. No existe ninguna herramienta oficial y unificada, por tanto, se deben tener claras las premisas necesarias para poder elegir la mejor herramienta, en función del alcance previsto y de las necesidades y limitaciones del estudio.

A continuación, se especifican las características de las principales aplicaciones de software desarrolladas para el estudio del impacto ambiental y se justifica la elección de la herramienta utilizada:

- **Sima Pro:** Se trata de la herramienta más utilizada en los estudios científicos, debido a su facilidad de uso y su completa BBDD. Es una herramienta de pago que dispone de una pequeña versión demo gratuita, por tiempo limitado, donde los materiales disponibles son muy limitados y solamente se permite trabajar en la metodología Ecoindicador99.
- **Gabi:** Herramienta más completa para realizar el estudio de impacto ambiental y análisis del ciclo de vida, donde se pueden generar escenarios de prueba, hacer estudios económicos y obtener resultados a medida del investigador. También se trata de una herramienta de pago que permite, en este caso, descargar una versión completa durante 30 días de prueba, pero no permite grabar los resultados.
- **OpenLCA:** Herramienta de código abierto y libre acceso a toda su información. Capacidad de trabajo con un amplio número de BBDD y metodologías de estudio, aunque el manejo de la herramienta resulta francamente difícil.

En la tabla siguiente (Tabla 14) se muestran las ventajas e inconvenientes de las principales herramientas de estudio de impacto ambiental:

Herramienta	Ventajas	Inconvenientes
<b>Sima Pro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilidad de uso</li> <li>- Completa BBDD</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- De pago, con versión demo limitada</li> <li>- Materiales limitados</li> <li>- Metodología Ecoindicador 99.</li> </ul>
<b>Gabi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Estudios muy completos</li> <li>- Sin limitación en los estudios y análisis, así como en los materiales y metodologías a utilizar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- De pago, con versión gratuita limitada.</li> <li>- Dificultad de uso</li> <li>- No permite guardar los resultados en su versión demo.</li> </ul>
<b>Open LCA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gratuita</li> <li>- Sin limitación en los estudios y análisis, así como en los materiales y metodologías a utilizar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dificultad de uso</li> <li>- Biblioteca de datos limitada</li> </ul>

**Tabla 14.** Ventajas e inconvenientes de las principales herramientas de estudio de impacto ambiental (Elaboración propia).

Dentro de la comunidad de software desarrollados en el ámbito LCA, la herramienta *OpenLCA* es un software libre y gratuito, con una enorme biblioteca de datos que ofrece prestaciones suficientes para valorar y comparar el impacto ambiental entre las distintas alternativas (Tam *et al.*, 2016). A pesar de que existan en el mercado otros programas mucho más completos (como Simapro y Gabi), con mayor cantidad de bases de datos del ciclo de vida y mayor flexibilidad en el diseño de muchos tipos de productos y sistemas para el cálculo exacto del impacto ambiental en cada factor, el propósito de este estudio no es la afinidad en dicho resultado sino la facilidad de comparativa entre alternativas y el libre acceso a la información. Por tanto, el objetivo en base a la medición ambiental es obtener una **relación fiable y acertada sobre cada alternativa de disposición y que la relación entre los distintos valores obtenidos, según la alternativa escogida, sea coherente y fiel a la realidad.** Dicha necesidad, queda cubierta ampliamente por el software *OpenLCA* a través de métodos de punto final como el Eco-Indicador 99 o el ReCiPe 16, entre otros.

- **Impacto Social.** La elección de una alternativa de disposición u otra puede tener grandes efectos sociales sobre la zona en la que se desarrollen las correspondientes actividades. Estos efectos sociales pueden incluir cambios en el modo de vida, en

la cultura, en la comunidad, en los sistemas políticos, en el medio ambiente, en la salud, en el bienestar, en los derechos personales, en los derechos de propiedad, etc (Cambero and Sowlati, 2014). Muchos de estos efectos sociales son difíciles de cuantificar constantemente para las diferentes alternativas de disposición, sobre todo, por la dificultad de identificación de la repercusión directa de cada alternativa y por el tiempo en el que tarda en manifestarse cada cambio social (apartado 5.3.3). Partiendo de la idea que la dimensión social debe reflejar los efectos internos y externos de la compañía (Halldórsson *et al.*, 2009; Labuschagne *et al.*, 2005), se seleccionan los siguientes aspectos para valorar el impacto social de las alternativas de disposición: **la creación de empleo y el desarrollo social de la zona**. Según se comentó en el apartado 9.3.3, dichos aspectos son seleccionados porque varían entre las distintas alternativas a elegir, son fácilmente medibles y son representativos con respecto al impacto social generado.

Para la creación de empleo, se cuantificarán las horas de trabajo generadas en base a cada alternativa de disposición. Y para estimar el impacto social sobre la zona, se establecerá un factor regional que vendrá dado entre el cociente del valor de la tasa de desempleo de la zona y el valor de la tasa de desempleo nacional.

De esta forma, el impacto social de cada alternativa vendrá dado por el producto entre las horas de trabajo necesario para desarrollar las acciones correspondientes y el factor regional de la zona donde se realizan dichas acciones.

### **11.3. Validación de la herramienta matemática genérica**

Como ya se ha introducido previamente, la validación de la herramienta matemática genérica se realizará a través de dos apartados: en primer lugar, se validará el correcto funcionamiento del modelo matemático genérico y, en segundo lugar, se validará que el proceso de solución es apropiado.

La validación del modelo se plantea en tres ámbitos, en base a la triple función objetivo que lo compone: ámbito económico, ambiental y social. De esta forma, para cada ámbito se validan todas y cada una de las posibles alternativas, en base a la **metodología** expuesta. La validación del proceso de solución se plantea asumiendo que la alternativa de solución de los tres ámbitos no coincide, según el esquema planteado en la Figura 63.

### 11.3.1. Validación del modelo matemático genérico

La validación del modelo matemático se inicia con la introducción del modelo matemático genérico, planteado en el capítulo 9, en un software de lenguaje de programación matemática (*Mathematic Programming Language - MPL*) mediante su lenguaje de programación. Una vez introducido el MM en el programa, se introducen todos los valores de los parámetros en la BBDD que servirá de complemento al software de programación lineal.

La BBDD que se va a utilizar está compuesta por tres tablas:

- **Products:** Esta tabla contiene los datos referentes al producto en su conjunto, como es el código del producto (*IdProduct*), los parámetros (*según sean económicos, ambiental o sociales*) y las alternativas que intervienen sobre el producto en su conjunto (*REUSE, REPAIR, REFURBISH Y REMANUFACTURE*).
- **Prod\_Comp:** Esta tabla contiene los datos referentes a los distintos componentes del producto. En este caso contiene el código del producto (*IdProduct*), el código del componente (*IdComponent*), los parámetros que hacen referencia al componente (*según sean económicos, ambientales o sociales*), así como las posibles alternativas aplicables a los componentes (*CANNIBALIZATION, RECYCLE, BURNING y DISPOSAL*).
- **Components:** Esta tabla está destinada a introducir los distintos componentes que contiene el producto.

El diagrama de relaciones y la composición de las tablas de la BBDD del modelo matemático económico se muestra a continuación:

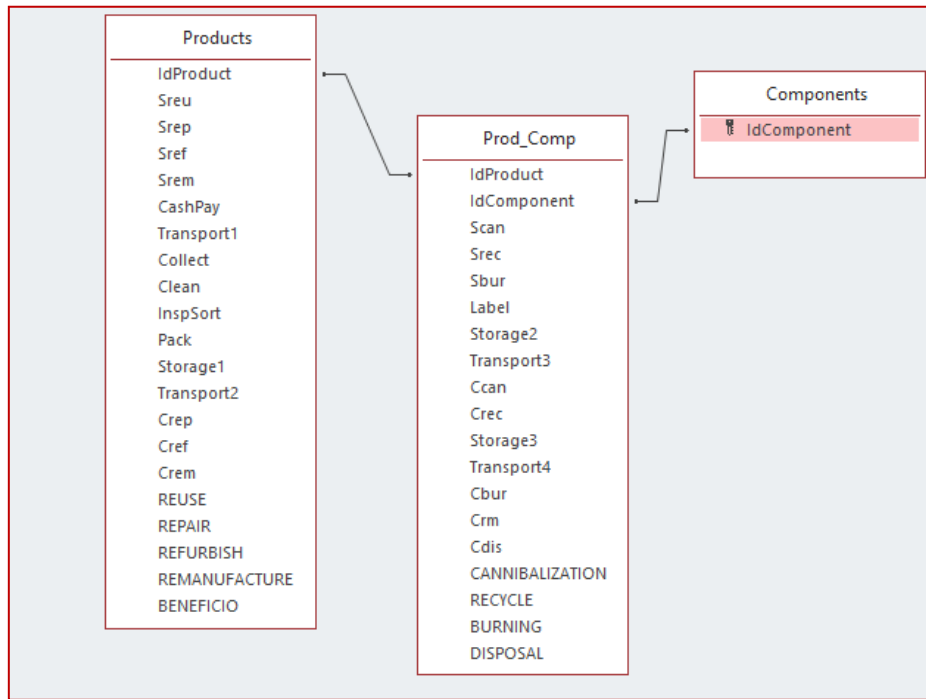


Figura 65. Diagrama de relaciones del modelo matemático económico (Elaboración propia).

El contenido de las tablas **Products** y **ProdComp** se puede apreciar en la figura siguiente (Figura 66). La parte superior de la figura muestra el contenido de la tabla **Products**, de manera que en el cuadrante izquierdo (color marrón), se introducen los valores económicos de las alternativas que tratan sobre el producto en su conjunto y en el cuadrante derecho (color azul) se muestran dichas posibles.

La parte inferior muestra el contenido de la tabla **ProdComp**, recogiendo en el cuadrante izquierdo (color verde), los valores económicos correspondientes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, de manera que hay una fila para cada componente y una columna para cada parámetro (en este ejemplo ingresos/costes). En el cuadrante derecho de la BBDD (color amarillo), se muestran las alternativas de tratamiento posibles para los componentes del producto.

<b>Products</b>		IdProd	Sreu	Srep	Sref	Srem	Cash	Tran	Collt	Clea	Insp	Pack	Stori	Tran	Crep	Cref	Cren	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMAN
Prod1		2000	60	70	95	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	15	18	25		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

<b>ProdComp</b>		IdCompon	Scan	Srec	Sbur	Labe	Stori	Tran	Ccan	Crec	Stori	Tran	Cbur	Crm	Cdis	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1		0,5	2	0,2	0,15	0,1	0,1	0,25	1	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2		15	10	0,5	1	0,25	0,1	7,5	5	0,3	0,15	0,25	0,1	0,3		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3		25	20	2	1,5	0,3	0,1	12,5	10	0,35	0,15	1	0,1	0,85		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4		10	8	0,5	0,25	0,15	0,1	5	4	0,2	0,15	0,25	0,1	0,55		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 66. Ejemplo de BBDD del modelo matemático económico (Elaboración propia)

Una vez introducido el modelo matemático en el software MPL y los valores de los parámetros en la BBDD, se obtendrá la solución del modelo mediante el solucionador (o solver) CPLEX. La solución que aporte el programa informático estará compuesta por



una alternativa de disposición y el valor objetivo correspondiente a dicha alternativa, entre otros datos.

En la figura siguiente se muestra un ejemplo del archivo de solución del software MPL, destacando mediante un círculo rojo el valor objetivo de la solución y la correspondiente alternativa de disposición seleccionada como óptima.

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDD
Filename:         RLTHBDDDec.mpl
Date:            July 3, 2019
Time:           17:26
Parsing time:    6.89 sec
MPL version:    5.0.8.116

Solver name:     CPLEX (11.2.1)
Objective value: 1958.50000000
MIP best bound: 1984.50000000
Integer nodes:  0
Improving nodes: 0
Iterations:     0
Solution time:  0.07 sec
Solver result:  Optimal integer solution found
Result code:    101
Constraints:    4
Variables:     20
Integers:      20
Nonzeros:      32
Density:       40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 1958.5000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[i] :
Variable Name      Activity
-----
REUPro             1.0000
    
```

**Figura 67.** Ejemplo de archivo de solución MPL del modelo matemático económico (Elaboración propia)

En este ejemplo se aprecia como la alternativa seleccionada es la reutilización (*REU*) y su valor objetivo se cifra en **1958'50**.

Asimismo, dicha alternativa también aparece reflejada como óptima en la BBDD, gracias a la conexión existente entre el software MPL y la BBDD. Por ejemplo, en la Figura 66, se aprecia como se ha marcado en la BBDD también la reutilización (*REUSE*) como alternativa de disposición más adecuada. De esta forma, la BBDD sirve de punto de entrada para introducir los valores de los parámetros correspondientes y de punto de salida donde mostrar la alternativa escogida.

Consecuentemente, la validación de cada alternativa se justifica mediante la presentación de la captura de pantalla de la BBDD, con la batería de valores introducidos en cada apartado y la alternativa de disposición seleccionada. Además, también se adjunta en cada apartado la captura de pantalla del archivo de solución del software MPL, donde se puede observar la alternativa seleccionada por el programa junto con el valor óptimo de la FO, entre otros datos.

A continuación, se experimenta, en primer lugar, sobre la función objetivo económica, en segundo lugar, sobre la función objetivo ambiental y, en tercer lugar, sobre la función objetivo social, para poder validar el correcto funcionamiento del modelo matemático en la elección de todas las alternativas de disposición posibles, cada una en la situación que más convenga. Para ello, se comprobará en cada función objetivo que el programa selecciona la alternativa más adecuada, en base a una batería de números que indican, a priori, cuál debe ser la solución. En la validación de la función objetivo económica, se modificarán los ingresos y los costes de las operaciones asociadas a las alternativas para poner en evidencia cuál debe ser la solución a elegir. En la función ambiental, se modificarán los valores de impacto ambiental de tal forma que se escoja la alternativa con menor impacto. Por el contrario, en la función social se modificarán los valores de impacto social para que el programa escoja la alternativa con mayor impacto. Se describe de manera más detallada a continuación:

- **Función objetivo económica**, se comprueba que el modelo matemático elige la alternativa más adecuada según los beneficios que esta le repercute. Para ello, se van a modificar los valores de ingresos y costes en cada alternativa, de manera que para comprobar que se escoge correctamente la alternativa adecuada, se subirá el valor de los ingresos que dicha alternativa tiene asociados y se bajan el valor de los costes asociados en comparación con el resto de las alternativas.
- **Función objetivo ambiental**, se comprueba que el modelo elige la alternativa con menor impacto ambiental. Para comprobar la correcta selección de cada alternativa, se van a reducir los valores de impacto ambiental asociados a dicha alternativa y se van a subir los valores de impacto ambiental del resto de alternativas.
- **Función objetivo social**, se comprueba que el modelo elige la alternativa con mayor impacto social. Para comprobar la correcta selección de cada alternativa, se van a aumentar los valores de impacto social asociados a dicha alternativa y se van a bajar los valores de impacto social del resto de alternativas.

A parte de comprobar cómo se van seleccionando las diferentes alternativas para cada función objetivo, se muestra cómo cada componente puede tener una alternativa de disposición diferente, como último apartado de cada función objetivo. Además, en las funciones objetivo ambiental y social se realiza un pequeño análisis de sensibilidad para

la elección de cada alternativa, de forma que se comprueba como el modelo escoge la alternativa más adecuada con una pequeña diferencia de una unidad a favor, y cómo deja de escogerla cuando esa pequeña diferencia es contraria. Dicho análisis de sensibilidad se realiza en estas funciones objetivo y no en la económica porque en la función objetivo económica no se aprecia fácilmente dichos cambios, pues son muchos los parámetros que afectan a distintas alternativas y se alargaría demasiado la validación, sin aportar nada nuevo y estando comprobado sobradamente el modelo a través del resto de funciones objetivo.

Para la experimentación del presente capítulo se utilizará un producto ficticio con cuatro componentes (Comp1, Comp2, Comp3 y Comp4) y con las ocho alternativas de disposición posibles:

Cuatro de ellas intervienen sobre el producto en su conjunto:

- reutilización - **REUSE**
- reparación - **REPAIR**
- reacondicionamiento - **REFURBISH**
- remanufacturación - **REMANUFACTURE**

y el resto de las alternativas intervienen sobre los componentes del producto:

- canibalización – **CANNIBALIZATION**
- reciclaje – **RECYCLE**
- incineración – **BURNING**
- vertido - **DISPOSAL**

A continuación, se muestra la validación de las tres funciones objetivo que componen el modelo matemático genérico.

#### **11.3.1.1. Función objetivo económica**

A través de la función objetivo de los aspectos económicos, se obtiene como la mejor alternativa de disposición aquella que maximiza la rentabilidad económica, fundamentado en la mayor diferencia positiva entre los ingresos y los costes. Para ello, se compara el resultado económico entre todas las alternativas y se escoge aquella que aporta el valor más elevado para el beneficio.

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

El programa MPL contiene el modelo matemático descrito en el capítulo 9, donde se recoge la función objetivo económica y todas las posibles alternativas como variables de decisión. Además, incluye todos los parámetros correspondientes a los ingresos y los gastos de los productos y de los componentes (Ver Anexo 11.5.1). Dentro del modelo, se hace referencia a la conexión con la BBDD económica (*RLTM.mdb*) donde se incluyen los valores correspondientes a los parámetros, relacionados según la tabla de relaciones expuesta en la Figura 65. Dentro de las tablas *Products* y *ProdComp* de la BBDD se introducen los parámetros económicos relacionados con las alternativas que intervienen sobre el producto en su conjunto y con las alternativas que hacen referencia a los componentes, respectivamente.

Como se aprecia en la Figura 68, en el margen izquierdo de ambas tablas se introducen los parámetros correspondientes a los ingresos según las alternativas de disposición (cuadros verdes), en la parte central se introducen los costes (cuadros rojos) y en el margen derecho se muestran las alternativas de disposición (cuadros azules).

IdProdi	IdProdi	Sreu	Srep	Sref	Sren	Cash	Tran	Coll	Clea	Insp	Pack	Stor	Tran	Crep	Cref	Cren	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	Prod1	2000	60	70	95	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	15	18	25	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

IdCompone	Scan	Srec	Sbur	Labe	Stor	Tran	Ccan	Crec	Stor	Tran	Cbur	Crm	Cdis	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	0,5	2	0,2	0,15	0,1	0,1	0,25	1	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	15	10	0,5	1	0,25	0,1	7,5	5	0,3	0,15	0,25	0,1	0,3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	25	20	2	1,5	0,3	0,1	12,5	10	0,35	0,15	1	0,1	0,85	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	10	8	0,5	0,25	0,15	0,1	5	4	0,2	0,15	0,25	0,1	0,55	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 68. Estructura de los parámetros de la BBDD del modelo matemático económico (Elaboración propia)

A continuación, se validará el modelo matemático comprobando que selecciona la alternativa más adecuada en base a la batería de datos introducida. Para comprobar que el modelo escoge la alternativa más adecuada, económicamente hablando, se introduce un conjunto de valores económicos (ingresos y costes) parecidos en todas las alternativas exceptuando la alternativa a comprobar en cuestión. En dicha alternativa se introduce un valor exageradamente elevado en los ingresos obtenidos a través de ella y se reducen los costes asociados a la misma o se aumentan los costes asociados al resto de alternativas.

Los valores serán suficientemente significativos con respecto al resto de alternativas para que se pueda apreciar fácilmente la alternativa a comprobar.

• **Alternativa de Reutilización**

Se introduce un valor en los ingresos obtenidos por la alternativa de reutilización ( $Sreu=2000$ ), superior al resto de alternativas, y se comprueba como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es la reutilización del producto (**REUSE**).

A continuación, se muestra la captura de pantalla de la BBDD donde se destaca con un círculo rojo el valor del ingreso de la alternativa de reutilización comentado y la alternativa seleccionada. Además, también se muestra la captura de pantalla del archivo de solución del programa MPL, donde se destaca la alternativa seleccionada y el valor objetivo.

IdProdi	Sreu	Srep	Sref	Sren	Cash	Tran	Coll	Clea	Insp	Pack	Stor	Tran	Crep	Cref	Cren	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANL
Prod1	2000	60	70	95	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	15	18	25	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompon	Scan	Srec	Sbur	Labe	Stor	Tran	Ccan	Crec	Stor	Tran	Cbur	Crn	Cdis	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL		
Comp1	0,5	2	0,2	0,15	0,1	0,1	0,25	1	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	15	10	0,5	1	0,25	0,1	7,5	5	0,3	0,15	0,25	0,1	0,3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	25	20	2	1,5	0,3	0,1	12,5	10	0,35	0,15	1	0,1	0,85	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	10	8	0,5	0,25	0,15	0,1	5	4	0,2	0,15	0,25	0,1	0,55	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
*	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 69.** BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Reutilización 1 (Elaboración propia).

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BBDD
Filename:         RLTH880Dec.npl
Date:             July 3, 2019
Time:             17:26
Parsing time:     6.09 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value: 1958.50000000
MIP best bound:  1984.50000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.07 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101
Constraints:     4
Variables:       20
Integers:        20
Nonzeros:        32
Density:         40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 1958.5000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[1]:
-----
Variable Name      Activity
-----
REUPro             1.0000
    
```

**Figura 70.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Reutilización 1 (Elaboración propia)

Puesto que la alternativa de reutilización no tiene unos costes únicos asociados a ella, se puede comprobar como el modelo escoge la alternativa de reutilización (**REUSE**), si los costes específicos del resto de las alternativas son exageradamente elevados ( $Crep=Cref=Cren=1500$ ), tal y como se muestra a continuación:

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

IdProdi	Sreu	Srep	Sref	Sren	Cash	Tran	Coll	Clea	Insp	Pack	Stor	Tran	Crep	Cref	Cren	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANL
Prod1	50	60	70	95	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	1500	1500	1500	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	Scan	Srec	Sbur	Labe	Stor	Tran	Ccan	Crec	Stor	Tran	Cbur	Crm	Cdis	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNINC	DISPOSAL		
Comp1	0,5	2	0,2	0,15	0,1	0,1	0,25	1	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	1,5	1	0,5	1	0,25	0,1	7,5	5	0,3	0,15	0,25	0,1	0,3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	2,5	2	2	1,5	0,3	0,1	12,5	10	0,35	0,15	1	0,1	0,85	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	1	8	0,5	0,25	0,15	0,1	5	4	0,2	0,15	0,25	0,1	0,55	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 71. BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Reutilización 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BBDD
Filename:         RLTHBBDDec.mpl
Date:             July 4, 2019
Time:             07:15
Parsing time:     3.95 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  8.5000000000
MIP best bound:  34.5000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:    101
Constraints:     4
Variables:      20
Integers:       20
Nonzeros:       32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 8.5000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[1]:
-----
Variable Name      Activity
-----
REUPro             1.0000
    
```

Figura 72. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Reutilización 2 (Elaboración propia)

• Alternativa de Reparación

Se introduce un valor en los ingresos obtenidos por la alternativa de reparación ( $Srep=600$ ), superior al resto de alternativas, y un valor nulo para los costes específicos de reparación ( $Crep=0$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es la reparación del producto (**REPAIR**).

IdProdi	Sreu	Srep	Sref	Sren	Cash	Tran	Coll	Clea	Insp	Pack	Stor	Tran	Crep	Cref	Cren	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANL
Prod1	50	600	70	95	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	0	1500	1500	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	Scan	Srec	Sbur	Labe	Stor	Tran	Ccan	Crec	Stor	Tran	Cbur	Crm	Cdis	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNINC	DISPOSAL		
Comp1	0,5	2	0,2	0,15	0,1	0,1	0,25	1	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	1,5	1	0,5	1	0,25	0,1	7,5	5	0,3	0,15	0,25	0,1	0,3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	2,5	2	2	1,5	0,3	0,1	12,5	10	0,35	0,15	1	0,1	0,85	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	1	8	0,5	0,25	0,15	0,1	5	4	0,2	0,15	0,25	0,1	0,55	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 73. BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Reparación (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BBDD
Filename:         RLTMBBDDec.mpl
Date:            July 4, 2019
Time:            07:19
Parsing time:     3.05 sec
MPL version:     5.0.8.116
Solver name:     CPLEX (11.2.1)
Objective value: 558.500000000
MIP best bound:  584.500000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:     0
Solution time:   0.01 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:    101
Constraints:    4
Variables:     20
Integers:      20
Nonzeros:     32
Density:       40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 558.5000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REP[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REPPro             1.0000
-----
    
```

Figura 74. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Reparación (Elaboración propia)

• **Alternativa de Reacondicionamiento**

Se introduce un valor en los ingresos obtenidos por la alternativa de reacondicionamiento ( $Sref=700$ ), superior al resto de alternativas, y un valor nulo para los costes específicos de reacondicionamiento ( $Cref=0$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es el reacondicionamiento del producto (**REFURBISH**).

IdProd	Sreu	Srep	Sref	Sren	Cash	Tran	Collc	Clea	Insp	Pack	Stor	Tran	Crep	Cref	Sren	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANL
Prod1	50	60	700	95	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	15	0	15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	Scan	Srec	Sbur	Labe	Stor	Tran	Ccan	Crec	Stor	Tran	Cbur	Crn	Cdis	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL		
Comp1	0,5	2	0,2	0,15	0,1	0,1	0,25	1	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	1,5	1	0,5	1	0,25	0,1	7,5	5	0,3	0,15	0,25	0,1	0,3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	2,5	2	2	1,5	0,3	0,1	12,5	10	0,35	0,15	1	0,1	0,85	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	1	8	0,5	0,25	0,15	0,1	5	4	0,2	0,15	0,25	0,1	0,55	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 75. BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Reacondicionamiento (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BBDD
Filename:          RLTHBDDDec.mpl
Date:              July 4, 2019
Time:              07:24
Parsing time:      2.79 sec
MPL version:       5.0.8.116

Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   658.500000000
MIP best bound:    684.500000000
Integer nodes:     0
Improving nodes:   0
Iterations:        0
Solution time:     0.00 sec
Solver result:     Optimal integer solution found
Result code:       101

Constraints:       4
Variables:         20
Integers:          20
Nonzeros:          32
Density:           40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 658.5000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REF[i] :

Variable Name      Activity
-----
REFPro             1.0000
    
```

Figura 76. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Reacondicionamiento (Elaboración propia)

• **Alternativa de Remanufacturación**

Se introduce un valor en los ingresos obtenidos por la alternativa de remanufacturación ( $Srem=900$ ), superior al resto de alternativas, y un valor nulo para los costes específicos de reparación ( $Crem=0$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es el reacondicionamiento del producto (**REMANUFACTURE**).

IdProdt	Sreu	Srep	Sref	Sren	Cash	Tran	Collc	Clea	Insp'	Pack	Stor:	Tran	Crep	Cref	Cren	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANL
Prod1	50	60	70	900	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	15	15	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
IdCompone	Scan	Srec	Sbur	Labe	Stor:	Tran	Ccan	Crec	Stor:	Tran	Cbur	Crn	Cdis	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNIN	DISROSAL		
Comp1	0,5	2	0,2	0,15	0,1	0,1	0,25	1	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	1,5	1	0,5	1	0,25	0,1	7,5	5	0,3	0,15	0,25	0,1	0,3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	2,5	2	2	1,5	0,3	0,1	12,5	10	0,35	0,15	1	0,1	0,85	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	1	8	0,5	0,25	0,15	0,1	5	4	0,2	0,15	0,25	0,1	0,55	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 77. BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Remanufacturación (Elaboración propia)



```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverscLogisticTreatmentModelBBDD
Filename: ALTHBDDec.mpl
Date: July 4, 2019
Time: 07:43
Parsing time: 2.46 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 858.500000000
MIP best bound: 884.500000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101

Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 858.5000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REH[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REHPro              1.0000
    
```

Figura 78. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Remanufacturación (Elaboración propia)

• **Alternativa de Canibalización**

Las alternativas anteriores eran específicas para los productos y, de ahora en adelante, se experimentará sobre las alternativas específicas de los componentes.

Se introduce un valor en los ingresos obtenidos por la alternativa de canibalización de cada componente ( $Scan=100$ ), superior al resto de alternativas, y un valor nulo para los costes específicos de canibalización ( $Ccan=0$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es la canibalización de todos los componentes del producto (**CANNIBALIZATION**).

IdProd1	Sreu	Srep	Sref	Sren	Cash	Tran	Collc	Clea	Insp1	Pack	Stor	Tran	Crep	Cref	Cren	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANL
Prod1	50	60	70	90	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	15	15	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	Scan	Srec	Sbur	Labe	Stor	Tran	Ccan	Crec	Stor	Tran	Cbur	Crn	Cdis	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL		
Comp1	100	2	0,2	0,15	0,1	0,1	0	1	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	1	0,5	1	0,25	0,1	0	5	0,3	0,15	0,25	0,1	0,3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	2	2	1,5	0,3	0,1	0	10	0,35	0,15	1	0,1	0,85	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	8	0,5	0,25	0,15	0,1	0	4	0,2	0,15	0,25	0,1	0,55	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 79. BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Canibalización (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDD
Filename:         RLTMBBDDec.mpl
Date:            July 4, 2019
Time:            07:52
Parsing time:    3.19 sec
MPL version:    5.0.8.116
Solver name:    CPLEX (11.2.1)
Objective value: 369.89999969
MIP best bound: 395.89999969
Integer nodes:  0
Improving nodes: 0
Iterations:    0
Solution time:  0.00 sec
Solver result:  Optimal integer solution found
Result code:    101
Constraints:    4
Variables:     20
Integers:      20
Nonzeros:      32
Density:       40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
  MAX Beneficio = 369.9000

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :

  Variable Name      Activity
-----
  CANProCom          1.0000
  CANProCom          1.0000
  CANProCom          1.0000
  CANProCom          1.0000
    
```

Figura 80. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Canibalización (Elaboración propia)

• **Alternativa de Reciclaje**

Se introduce un valor en los ingresos obtenidos por la alternativa de reciclaje de cada componente ( $Srec=100$ ), superior al resto de alternativas, y un valor nulo para los costes específicos de canibalización ( $Crec=0$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es el reciclaje de todos los componentes del producto (**RECYCLE**).

IdProdi	Sreu	Srep	Sref	Sren	Cash	Tran	Colle	Clea	Insp	Pack	Stor	Tran	Crep	Cref	Cren	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANL
Prod1	50	60	70	90	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	15	15	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	Scan	Srec	Sbur	Labe	Stor	Tran	Ccan	Crec	Stor	Tran	Cbur	Crn	Cdis	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNIN	DISPOSAL		
Comp1	1	100	0,2	0,15	0,1	0,1	2	0	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	1	100	0,5	1	0,25	0,1	2	0	0,3	0,15	0,25	0,1	0,3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	1	100	2	1,5	0,3	0,1	2	0	0,35	0,15	1	0,1	0,85	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	1	100	0,5	0,25	0,15	0,1	2	0	0,2	0,15	0,25	0,1	0,55	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 81. BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Reciclaje (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDD
Filename:          RLTHBDDDec.mpl
Date:             July 5, 2019
Time:             07:21
Parsing time:     4.34 sec
MPL version:      5.0.8.116

Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:  369.899999969
MIP best bound:   395.899999969
Integer nodes:    0
Improving nodes:  0
Iterations:       0
Solution time:    0.06 sec
Solver result:    Optimal integer solution found
Result code:      101
Constraints:      4
Variables:        20
Integers:         20
Nonzeros:         32
Density:          40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 369.9000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REC[i,j] :

-----
Variable Name      Activity
-----
RECProCom          1.0000
RECProCom          1.0000
RECProCom          1.0000
RECProCom          1.0000
    
```

Figura 82. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Reciclaje (Elaboración propia)

• **Alternativa de Incineración**

Se introduce un valor en los ingresos obtenidos por la alternativa de incineración de cada componente ( $Sbur=100$ ), superior al resto de alternativas, y un valor nulo para los costes específicos de incineración ( $Cbur=0$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es la incineración de todos los componentes del producto (**BURNING**).

IdProdi	Sreu	Srep	Sref	Sren	Cash	Tran	Coll	Clea	Insp	Pack	Stor	Tran	Crep	Cref	Cren	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANL
Prod1	50	60	70	90	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	15	15	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	Scan	Srec	Sbur	Labe	Stor	Tran	Ccan	Crec	Stor	Tran	Cbur	Crm	Cdis	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL		
Comp1	1	1	100	0,15	0,1	0,1	2	5	0,15	0,15	0	0,1	0,15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	1	1	100	1	0,25	0,1	2	5	0,3	0,15	0	0,1	0,3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	1	1	100	1,5	0,3	0,1	2	5	0,35	0,15	0	0,1	0,85	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	1	1	100	0,25	0,15	0,1	2	5	0,2	0,15	0	0,1	0,55	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 83. BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Incineración (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDD
Filename:         RLMBDDDec.mpl
Date:            July 5, 2019
Time:            07:27
Parsing time:     3.61 sec
MPL version:     5.0.8.116
Solver name:     CPLEX (11.2.1)
Objective value: 371.999999955
MIP best bound:  397.999999955
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:     0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101
Constraints:     4
Variables:      20
Integers:       20
Nonzeros:       32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 372.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE BUR[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
BURProCom          1.0000
BURProCom          1.0000
BURProCom          1.0000
BURProCom          1.0000
    
```

Figura 84. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Incineración (Elaboración propia)

• Alternativa de Vertido

La alternativa de vertido, al no tener ingresos contemplados, se valida anulando todos los ingresos específicos del resto de alternativas ( $Sreu=Srep=Srem=Sref=Scan=Srec=Sbur=0$ ) y asignando un valor nulo en los costes específicos de vertido ( $Cdis=0$ ), forzando así al programa a elegir la alternativa de vertido (**DISPOSAL**) como la más adecuada.

IdProd	Sreu	Srep	Sref	Srem	Cash	Tran	Coll	Clea	Insp	Pack	Stor	Tran	Crep	Cref	Cren	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANL
Prod1	0	0	0	0	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	15	10					
IdCompone	Scan	Srec	Sbur	Lane	Stor	Tran	Ccan	Crec	Stor	Tran	Cbur	Crn	Cdis	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNIN	DISPOSAL		
Comp1	0	0	0	0	0,15	0,1	0,1	2	5	0,15	0,15	0,5	0,1	0				<input checked="" type="checkbox"/>	
Comp2	0	0	0	0	1	0,25	0,1	2	5	0,3	0,15	0,5	0,1	0				<input checked="" type="checkbox"/>	
Comp3	0	0	0	0	1,5	0,3	0,1	2	5	0,35	0,15	0,5	0,1	0				<input checked="" type="checkbox"/>	
Comp4	0	0	0	0	0,25	0,15	0,1	2	5	0,2	0,15	0,5	0,1	0				<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 85. BBDD del modelo matemático económico para la alternativa de Vertido (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModel18BDD
Filename: RLTHBDDDec.mpl
Date: July 5, 2019
Time: 07:34
Parsing time: 3.50 sec
MPL version: 5.0.0.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: -27.6000000387
MIP best bound: -1.600000003874
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.01 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = -27.6000

DECISION VARIABLES
VARIABLE DIS[i,j] :
-----
Variable Name Activity
-----
DISProCom 1.0000
DISProCom 1.0000
DISProCom 1.0000
DISProCom 1.0000
    
```

Figura 86. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la alternativa de Vertido (Elaboración propia)

- **Heterogeneidad en las alternativas de componentes**

Tal y como ya se ha comentado anteriormente, las cuatro primeras alternativas (reutilización, reparación, reacondicionamiento y remanufactura) hacen referencia a todo el producto en su conjunto, mientras el resto de las alternativas (canibalización, reciclaje, incineración y vertido) hacen referencia a los componentes del producto.

Respecto a este segundo grupo de alternativas, el sistema cuenta con la posibilidad de otorgar una alternativa de disposición diferente a cada componente. De esta manera, si se introducen valores elevados a los ingresos de los componentes (*Scan* para Comp1, *Srec* para Comp2 y *Sbur* para Comp3), para forzar una alternativa diferente a cada componente, se puede observar que el programa elige las alternativas de los componentes de manera independiente (*CANNIBALIZATION* para Comp1, *RECYCLE* para Comp2, *BURNING* para Comp3 y *DISPOSAL* para Comp4).

IdProd1	Sreu	Srep	Sref	Sren	Cash	Tran	Collc	Clea	Insp1	Pack	Stor1	Tran	Crep	Cref	Cren	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
IdCompon	Scan	Srec	Sbur	Labe	Stor1	Tran	Ccan	Crec	Stor1	Tran	Cbur	Crm	Cals	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL		
Prod1	0	0	0	0	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	15	15	10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp1	100	0	0	0	0,15	0,1	0,1	2	5	0,15	0,15	0,5	0,1	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	0	100	0	0	1	0,25	0,1	2	5	0,3	0,15	0,5	0,1	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	0	0	100	0	1,5	0,3	0,1	2	5	0,35	0,15	0,5	0,1	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	0	0	0	0	0,25	0,15	0,1	2	5	0,2	0,15	0,5	0,1	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 87. BBDD del modelo matemático económico con heterogeneidad en las alternativas de los componentes (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDD
Filename:         RLTHBDDDec.mpl
Date:            July 5, 2019
Time:            09:53
Parsing time:     3.20 sec
MPL version:     5.0.8.116
Solver name:     CPLEX (11.2.1)
Objective value: 263.84999979
MIP best bound:  289.84999979
Integer nodes:   0Improving nodes:  0Iterations:      0Solution time:   0.08 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101Constraints:      4Variables:      20Integers:        20
Nonzeros:       32Density:           40 %
SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 263.8500
DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
Variable Name      Activity
CANProCon          1.0000
CANProCon          -
CANProCon          -
CANProCon          -
VARIABLE REC[i,j] :
RECProCon          -
RECProCon          1.0000
RECProCon          -
RECProCon          -
VARIABLE BUR[i,j] :
BURProCon          -
BURProCon          -
BURProCon          1.0000
BURProCon          -
VARIABLE DIS[i,j] :
DISProCon          -
DISProCon          -
DISProCon          -
DISProCon          1.0000
    
```

**Figura 88.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico con heterogeneidad en las alternativas de los componentes (Elaboración propia)

### 11.3.1.2. Función objetivo ambiental

A través de la función objetivo de los aspectos ambientales, se obtiene como la mejor alternativa de disposición aquella que minimiza el impacto ambiental. Para ello, se compara el valor del impacto ambiental asociado a cada alternativa y se escoge aquella alternativa que aporta el valor más bajo.

El programa MPL contiene el modelo ambiental descrito en el capítulo 9, donde se recoge la función objetivo ambiental y todas las posibles alternativas como variables de decisión. Además, incluye todos los parámetros sobre el impacto ambiental de las distintas operaciones asociadas a las alternativas (Ver Anexo 11.5.2). Dentro del modelo se hace referencia a la conexión con la BBDD ambiental (*RLTMamb.mdb*) donde se incluyen los valores correspondientes a los parámetros, relacionados según la tabla de relaciones expuesta en la Figura 89.

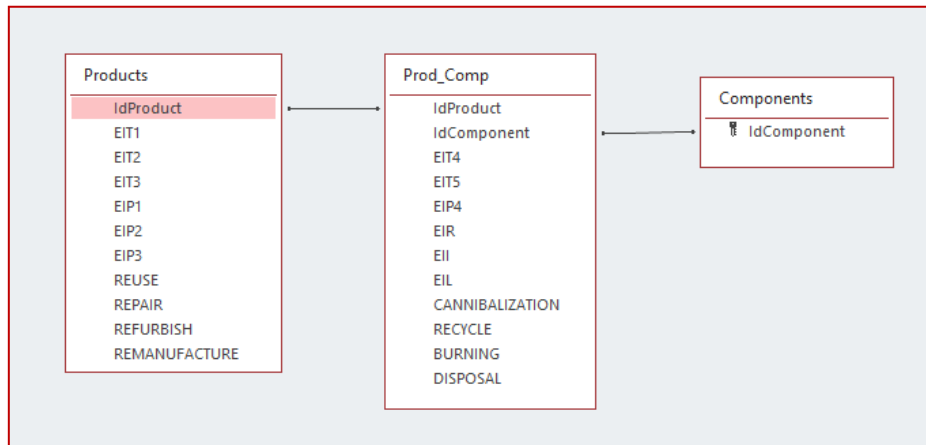


Figura 89. Diagrama de relaciones del modelo matemático ambiental (Elaboración propia)

La BBDD conectada con el modelo matemático ambiental está compuesta por tres tablas que, igual que en la función matemática económica, la tabla **“Products”** contiene los parámetros y las opciones de disposición referentes a las alternativas que trabajan el producto en su conjunto, la tabla **“Prod\_Comp”** contiene los parámetros y las alternativas que tratan de aprovechar los componentes y la tabla **“Components”** indica los componentes que tiene cada producto.

Como se aprecia en la Figura 90, en el margen izquierdo de ambas tablas se introducen los parámetros correspondientes al impacto ambiental de las operaciones relacionadas según las alternativas de disposición (cuadros verdes) y en el margen derecho se muestran las alternativas de disposición.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	0	0	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 90. Estructura de los parámetros de la BBDD del modelo matemático ambiental (Elaboración propia)

A continuación, se validará el modelo matemático comprobando que selecciona la alternativa más adecuada en base a la batería de datos introducida. Para comprobar que el modelo escoge la alternativa más adecuada, ambientalmente hablando, se introduce **valores de impacto ambiental muy elevados en todas las alternativas, exceptuando en las operaciones relacionadas con la alternativa a comprobar en cuestión, los**

cuales se dejarán en valor nulo o negativo forzando así al modelo a seleccionar dicha alternativa.

Además, para cada alternativa, se realizará un pequeño análisis de sensibilidad en dos fases. En primer lugar, se reduce la diferencia entre el impacto ambiental de la alternativa a seleccionar y el resto de las **alternativas en 1 unidad, a favor de la primera**, y se comprueba que el programa la sigue seleccionando. En segundo lugar, se reduce aún más la diferencia de forma que el valor del **impacto ambiental de la primera alternativa es superior al resto**, comprobando como en ese escenario el programa ya no selecciona dicha alternativa como óptima.

• **Alternativa de Reutilización**

Se introduce un valor nulo de impacto ambiental en los parámetros asociados a la alternativa de reutilización ( $EIT1 = EIT2 = 0$ ), mientras que las operaciones asociadas al resto de alternativas tienen un impacto ambiental positivo, comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es la reutilización del producto (**REUSE**).

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	0	0	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 91. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reutilización 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2019, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBBDDanb
Filename: RLTMDDDanb.mpl
Date: June 2, 2019
Time: 09:11
Parsing time: 0.78 sec
MPL version: 5.6.8.116

Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 0.000000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101

Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp = .

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REUPro             1.0000
    
```

Figura 92. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reutilización 1 (Elaboración propia)



PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

La sensibilidad del modelo se analiza al reducir en una unidad el impacto ambiental asociado a la alternativa de reutilización ( $EIT1=99$ ), respecto al resto de alternativas. Se comprueba como el programa sigue eligiendo la reutilización como la mejor alternativa.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	99	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	101	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	101	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 93. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reutilización 2 (Elaboración propia)

```
MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1B8DDanb
Filename:          RLTH8DDanb.mpl
Date:              June 5, 2019
Time:              07:22
Parsing time:      3.39 sec
MPL version:       5.0.8.116

Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   199.000000000
MIP best bound:    100.000000000
Integer nodes:     0
Improving nodes:  0
Iterations:        0
Solution time:     0.00 sec
Solver result:     Optimal integer solution found
Result code:       101

Constraints:       4
Variables:         20
Integers:          20
Nonzeros:          32
Density:           40 %

SOLUTION RESULT
  Optimal integer solution found
  MIN EnvironmentalImp = 199.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[1] :
  Variable Name      Activity
-----
  REUPro              1.0000
-----
```

Figura 94. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reutilización 2 (Elaboración propia)

El impacto ambiental relacionado con la alternativa de reutilización es común a otras alternativas porque no tiene operaciones específicas de impacto ambiental y todos los parámetros referentes a su impacto ambiental son comunes a otras alternativas ( $EIT1$  a todas las alternativas y  $EIT2$  a todas las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado). Por ello, para comprobar que el programa deja de seleccionar la reutilización como la mejor alternativa, se introduce un valor de impacto ambiental lo suficientemente elevado ( $EIT2=1000$ ) como para optar por alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, seleccionando en este caso la canibalización para todos ellos.

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	1000	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	101	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 95. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reutilización 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb
Filename: RLTHBBDDamb.mpl
Date: June 5, 2019
Time: 07:26
Parsing time: 3.17 sec
MPL version: 5.0.8.116

Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 900.00000000
MIP best bound: 800.00000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101

Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp = 900.0000
DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
    
```

Figura 96. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reutilización 3 (Elaboración propia)

• **Alternativa de Reparación**

Se introduce un valor negativo de impacto ambiental en los parámetros específicos asociados a la alternativa de reparación ( $EIP1 = -10000$ ), mientras que los parámetros asociados al resto de alternativas tienen un impacto ambiental positivo, comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es la reparación del producto (**REPAIR**).

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBISH	REMANUFAI
Prod1	100	100	100	-10000	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 97. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reparación 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBDDamb
Filename: RLTMBDDamb.mpl
Date: June 5, 2019
Time: 07:31
Parsing time: 2.65 sec
MPL version: 5.0.8.116

Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: -700.000000000
MIP best bound: -800.000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.02 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101

Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp = -700.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REP[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REPPro             1.0000
-----
    
```

Figura 98 Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reparación 1 (Elaboración propia)

La sensibilidad del modelo se analiza al reducir en una unidad el impacto ambiental asociado a la alternativa de reparación respecto al resto de alternativas. En este caso, se reduce en una unidad el impacto ambiental del proceso de reparación ( $EIP1=-1$ ) y se elimina el impacto ambiental de transporte que no le afecta a la reutilización ( $EIT3=0$ ), puesto que los valores de impacto ambiental que afectan a la reutilización ( $EIT1$  y  $EIT2$ ) también afectan al resto de alternativas de intervención sobre el producto en su conjunto. Se comprueba como el programa sigue eligiendo la reparación como la mejor alternativa

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	100	0	-1	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIP5	EIP6	EIP7	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 99. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reparación 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDanb

Filename:         RLTMBBDDanb.mpl
Date:            June 5, 2019
Time:            07:36
Parsing time:    2.94 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value: 199.000000000
MIP best bound:  99.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:     4
Variables:      20
Integers:       20
Nonzeros:       32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp =      199.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REP[i] :

Variable Name      Activity
-----
REPPro             1.0000
    
```

**Figura 100.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reparación 2 (Elaboración propia)

Para comprobar que el programa deja de seleccionar la reparación como la mejor alternativa, se incrementa, respecto al caso anterior, en una unidad el impacto ambiental del proceso de reparación ( $EIP1=0$ ) para optar por otra alternativa diferente.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	100	0	0	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 101.** BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reparación 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BBDDamb

Filename:         RLTMBBDDamb.mpl
Date:             June 5, 2019
Time:             07:40
Parsing time:     2.80 sec
MPL version:      5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  200.000000000
MIP best bound:  100.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.02 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:      4
Variables:        20
Integers:         20
Nonzeros:         32
Density:          40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
  MIN EnvironmentalImp =      200.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[i] :

      Variable Name      Activity
-----
      REUPro              1.0000
    
```

Figura 102. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reparación 3 (Elaboración propia)

• **Alternativa de Reacondicionamiento**

Se introduce un valor negativo de impacto ambiental en los parámetros asociados a la alternativa de **reacondicionamiento** ( $EIP2 = -10000$ ), mientras que las operaciones asociadas al resto de alternativas tienen un impacto ambiental positivo, comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es el **reacondicionamiento** del producto (**REFURBISHMENT**).

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBISH	REMANUFA
Prod1	100	100	100	100	-10000	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 103. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reacondicionamiento 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBDDamb
Filename:         RLTHBDDamb.mpl
Date:            June 5, 2019
Time:            07:45
Parsing time:     2.90 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  -9700.00000000
MIP best bound:  -9800.00000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.02 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:     4
Variables:       20
Integers:       20
Nonzeros:       32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp = -9700.0000

VARIABLE REF[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REFPro             1.0000
-----
    
```

Figura 104. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reacondicionamiento 1 (Elaboración propia)

La sensibilidad del modelo se analiza al reducir en una unidad el impacto ambiental asociado a la alternativa de reacondicionamiento respecto al resto de alternativas. En este caso, se reduce en una unidad el impacto ambiental del proceso de reacondicionamiento ( $EIP2=-1$ ) y se elimina el impacto ambiental de transporte que no le afecta a la reutilización ( $EIT3=0$ ). Se comprueba como el programa sigue eligiendo el reacondicionamiento como la mejor alternativa

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	100	0	100	-1	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 105. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reacondicionamiento 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode18BDDamb
Filename:         RLTM8BDDamb.mpl
Date:            June 5, 2019
Time:            07:47
Parsing time:     2.73 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  199.000000000
MIP best bound:  99.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:     4
Variables:      20
Integers:       20
Nonzeros:       32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
  MIN EnvironmentalImp =      199.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REF[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REFPro             1.0000
    
```

**Figura 106.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reacondicionamiento 2 (Elaboración propia)

Para comprobar que el programa deja de seleccionar el reacondicionamiento como la mejor alternativa, se incrementa, respecto al caso anterior, en una unidad el impacto ambiental del proceso de reacondicionamiento ( $EIP2=0$ ), optando por otra alternativa diferente.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	100	0	100	0	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 107.** BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reacondicionamiento 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb
Filename:         RLTHBBDDamb.mpl
Date:            June 5, 2019
Time:           07:50
Parsing time:    3.69 sec
MPL version:    5.0.0.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  200.000000000
MIP best bound:  100.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.02 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:      4
Variables:        20
Integers:         20
Nonzeros:        32
Density:         40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
  MIN EnvironmentalImp =      200.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[1] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REUPro             1.0000
    
```

Figura 108. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reacondicionamiento 3 (Elaboración propia)

• **Alternativa de Remanufactura**

Se introduce un valor negativo de impacto ambiental en los parámetros asociados a la alternativa de **remanufactura** ( $EIP3=-10000$ ), mientras que las operaciones asociadas al resto de alternativas tienen un impacto ambiental positivo, comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es la **remanufactura** del producto (**REMANUFACTURING**).

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBISH	REMANUFACTURING
Prod1	100	100	100	100	100	-10000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 109. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Remanufactura 1 (Elaboración propia)



```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModel188DDamb
Filename:         RLTH88DDamb.mpl
Date:            June 5, 2019
Time:            07:53
Parsing time:    3.53 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  -9700.00000000
MIP best bound:  -9800.00000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:      4
Variables:       20
Integers:        20
Nonzeros:        32
Density:         40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIM EnvironmentalImp = -9700.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REM[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REMPro             1.0000
    
```

Figura 110. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Remanufactura<sup>1</sup> (Elaboración propia)

La sensibilidad del modelo se analiza al reducir en una unidad el impacto ambiental asociado a la alternativa de remanufactura<sup>1</sup> respecto al resto de alternativas. En este caso, se reduce en una unidad el impacto ambiental del proceso de remanufactura<sup>1</sup> ( $EIP3=-1$ ) y se elimina el impacto ambiental de transporte que no le afecta a la reutilización ( $EIT3=0$ ). Se comprueba como el programa sigue eligiendo la remanufactura<sup>1</sup> como la mejor alternativa

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	100	0	100	100	-1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 111. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Remanufactura<sup>2</sup> (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BBDDamb
Filename:          RLTMBBDDamb.mpl
Date:              June 5, 2019
Time:              07:54
Parsing time:      3.08 sec
MPL version:       5.0.8.116

Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   199.000000000
MIP best bound:   99.000000000
Integer nodes:    0
Improving nodes:  0
Iterations:       0
Solution time:    0.01 sec
Solver result:    Optimal integer solution found
Result code:      101

Constraints:       4
Variables:         20
Integers:          20
Nonzeros:          32
Density:           40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
  MIN EnvironmentalImp = 199.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REH[i] :

-----
Variable Name      Activity
-----
REHPro              1.0000
    
```

**Figura 112.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Remanufacturación 2 (Elaboración propia)

Para comprobar que el programa deja de seleccionar la reparación como la mejor alternativa, se incrementa, respecto al caso anterior, en una unidad el impacto ambiental del proceso de remanufacturación ( $EIP3=0$ ) para optar por otra alternativa diferente.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI!	REMANU
Prod1	100	100	0	100	100	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 113.** BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Remanufacturación 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb
Filename:         RLTHBDDamb.mpl
Date:            June 5, 2019
Time:           07:56
Parsing time:    3.12 sec
MPL version:    5.0.8.116

Solver name:     CPLEX (11.2.1)
Objective value: 200.000000000
MIP best bound: 100.000000000
Integer nodes:  0
Improving nodes: 0
Iterations:     0
Solution time:  0.00 sec
Solver result:  Optimal integer solution found
Result code:    101

Constraints:     4
Variables:      20
Integers:       20
Nonzeros:       32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp = 200.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REUPro             1.0000
    
```

Figura 114. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Remanufactura3 (Elaboración propia)

• **Alternativa de Canibalización**

Se introduce un valor nulo de impacto ambiental en los parámetros asociados a la alternativa de **canibalización** de cada componente ( $EIP4_1 = EIP4_2 = EIP4_3 = EIP4_4 = 0$ ), mientras que las operaciones asociadas al resto de alternativas tienen un impacto ambiental positivo, comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es la **canibalización de todos los componentes** del producto (**CANNIBALIZATION**).

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBISH	REMANUFAC
Prod1	100	500	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdComponen	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	0	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	0	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	0	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	0	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 115. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Canibalización 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb
Filename:         RLTHBDDamb.mpl
Date:            June 5, 2019
Time:            18:38
Parsing time:    2.87 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  500.000000000
MIP best bound:  400.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:     4
Variables:       20
Integers:        20
Nonzeros:        32
Density:         40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
  MIN EnvironmentalImp = 500.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :

Variable Name      Activity
-----
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
    
```

**Figura 116.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Canibalización 1 (Elaboración propia)

La sensibilidad del modelo se analiza al reducir el impacto ambiental asociado a la alternativa de **canibalización** para cada componente ( $EIP4_1=EIP4_2=EIP4_3=EIP4_4=24$ ), respecto al resto de alternativas (en este caso, las alternativas de intervención sobre el producto en su conjunto tienen un impacto ambiental asociado  $EIP1=EIP2=EIP3=100$ ). Se comprueba como el programa sigue eligiendo la **canibalización** como la mejor alternativa para todos los componentes.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	500	100	100	100	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	24	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	24	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	24	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	24	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 117.** BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Canibalización 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BBDDamb
Filename:         RL1MBDDamb.mpl
Date:            June 5, 2019
Time:           10:35
Parsing time:    3.18 sec
MPL version:    5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value: 596.000000000
MIP best bound:  496.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:     0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:    101

Constraints:     4
Variables:      20
Integers:       20
Nonzeros:       32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
  MIN EnvironmentalImp =          596.0000
DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :

  Variable Name      Activity
-----
  CANProCon          1.0000
  CANProCon          1.0000
  CANProCon          1.0000
  CANProCon          1.0000
    
```

**Figura 118.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Canibalización 2 (Elaboración propia)

Para comprobar que el programa deja de seleccionar la canibalización como la mejor alternativa de todos los componentes, se introduce un valor de impacto ambiental ligeramente superior al resto de alternativas ( $EIP4_1=EIP4_2=EIP4_3=EIP4_4=26$ ), seleccionando en este caso otra alternativa diferente.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	500	100	100	100	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	26	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	26	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	26	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	26	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 119.** BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Canibalización 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb
Filename:         RLTMBBDDamb.mpl
Date:            June 5, 2019
Time:            11:01
Parsing time:    2.65 sec
MPL version:    5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  600.000000000
MIP best bound:  500.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:      4
Variables:       20
Integers:        20
Nonzeros:        32
Density:         40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
  MIN EnvironmentalImp =      600.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REUPro             1.0000
    
```

Figura 120. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Canibalización 3 (Elaboración propia)

• **Alternativa de Reciclaje**

Se introduce un valor nulo de impacto ambiental en los parámetros asociados a la alternativa de **reciclaje** de cada componente ( $EIR_1 = EIR_2 = EIR_3 = EIR_4 = 0$ ), mientras que las operaciones asociadas al resto de alternativas tienen un impacto ambiental positivo, comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es el **reciclaje de todos los componentes** del producto (**RECYCLE**).

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBISH	REMANUFACTURE
Prod1	100	500	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	0	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	0	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	0	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	0	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 121. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reciclaje 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModel1BDDamb
Filename:          RL1MBDDamb.mpl
Date:             June 5, 2019
Time:             11:04
Parsing time:     3.04 sec
MPL version:      5.8.8.116

Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   500.00000000
MIP best bound:   400.00000000
Integer nodes:    0
Improving nodes:  0
Iterations:       0
Solution time:    0.00 sec
Solver result:    Optimal integer solution found
Result code:      101
Constraints:      4
Variables:        20
Integers:         20
Nonzeros:         32
Density:          40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp = 500.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REC[i,j] :

-----
Variable Name      Activity
-----
RECProCom          1.0000
RECProCom          1.0000
RECProCom          1.0000
RECProCom          1.0000
    
```

Figura 122. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reciclaje 1 (Elaboración propia)

La sensibilidad del modelo se analiza al reducir el impacto ambiental asociado a la alternativa de **reciclaje** para cada componente ( $EIR_1 = EIR_2 = EIR_3 = EIR_4 = 24$ ), respecto al resto de alternativas. Se comprueba como el programa sigue eligiendo el **reciclaje** como la mejor alternativa para todos los componentes.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	500	100	100	100	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL	
Comp1	100	100	100	24	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Comp2	100	100	100	24	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Comp3	100	100	100	24	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Comp4	100	100	100	24	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 123. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reciclaje 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentHode1BDDamb
Filename: RLTHBDDamb.mpl
Date: June 5, 2019
Time: 11:06
Parsing time: 2.69 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 596.00000000
MIP best bound: 496.00000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101

Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp = 596.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REC[i,j] :

Variable Name Activity
-----
RECProCom 1.0000
RECProCom 1.0000
RECProCom 1.0000
RECProCom 1.0000
    
```

Figura 124. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reciclaje 2 (Elaboración propia)

Para comprobar que el programa deja de seleccionar el reciclaje como la mejor alternativa de todos los componentes, se introduce un valor de impacto ambiental ligeramente superior al resto de alternativas ( $EIR_1=EIR_2=EIR_3=EIR_4=26$ ), seleccionando en este caso otra alternativa diferente.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	500	100	100	100	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	26	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	26	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	26	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	26	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 125. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reciclaje 3 (Elaboración propia)



```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BDDamb
Filename:         RLTHBDDamb.mpl
Date:            June 5, 2019
Time:           11:11
Parsing time:    2.84 sec
MPL version:    5.0.8.116

Solver name:     CPLEX (11.2.1)
Objective value: 600.000000000
MIP best bound: 500.000000000
Integer nodes:  0
Improving nodes: 0
Iterations:     0
Solution time:  0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:    101

Constraints:     4
Variables:      20
Integers:       20
Nonzeros:       32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp = 600.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[i] :

-----
Variable Name      Activity
-----
REUPro             1.0000
-----
    
```

Figura 126. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Reciclaje 3 (Elaboración propia)

• **Alternativa de Incineración**

Se introduce un valor nulo de impacto ambiental en los parámetros asociados a la alternativa de **incineración** de cada componente ( $EII_1 = EII_2 = EII_3 = EII_4 = 0$ ), mientras que las operaciones asociadas al resto de alternativas tienen un impacto ambiental positivo, comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es la **incineración de todos los componentes** del producto (**BURNING**).

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBISH	REMANUFACTURE	
Prod1	100	500	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL	
Comp1	100	100	100	100	0	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Comp2	100	100	100	100	0	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Comp3	100	100	100	100	0	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Comp4	100	100	100	100	0	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Figura 127. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Incineración 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModel1BDDamb
Filename:         RLTM88DDamb.mpl
Date:            May 27, 2019
Time:            11:31
Parsing time:    3.79 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  500.000000000
MIP best bound:  400.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.02 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:     4
Variables:       20
Integers:        20
Nonzeros:        32
Density:         40 %

SOLUTION RESULT

Optimal integer solution found

MIN EnvironmentalImp = 500.0000
    
```

**Figura 128.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Incineración 1 (Elaboración propia)

La sensibilidad del modelo se analiza al reducir el impacto ambiental asociado a la alternativa de **incineración** para cada componente ( $EII_1 = EII_2 = EII_3 = EII_4 = 24$ ), respecto al resto de alternativas. Se comprueba como el programa sigue eligiendo la **incineración** como la mejor alternativa para todos los componentes.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	500	100	100	100	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	24	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	24	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	24	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	24	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 129.** BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Incineración 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb
Filename:         RLTHBBDDamb.mpl
Date:            July 5, 2019
Time:            10:19
Parsing time:     2.81 sec
MPL version:     5.0.8.116
Solver name:     CPLEX (11.2.1)
Objective value: 596.000000000
MIP best bound:  496.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:      4
Variables:       20
Integers:        20
Nonzeros:        32
Density:         40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
HIM EnvironmentalImp = 596.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE BUR[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
BURProCom          1.0000
BURProCom          1.0000
BURProCom          1.0000
BURProCom          1.0000
    
```

Figura 130. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Incineración 2 (Elaboración propia)

Para comprobar que el programa deja de seleccionar la incineración como la mejor alternativa de todos los componentes, se introduce un valor de impacto ambiental ligeramente superior al resto de alternativas ( $EII_1=EII_2=EII_3=EII_4=26$ ), seleccionando en este caso otra alternativa diferente.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	500	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	26	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	26	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	26	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	26	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 131. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Incineración 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb
Filename: RLTHBDDamb.mpl
Date: July 5, 2019
Time: 18:23
Parsing time: 2.82 sec
MPL version: 5.0.8.116

Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 600.000000000
MIP best bound: 500.000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101

Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp = 600.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[i] :

Variable Name      Activity
-----
REUPro             1.0000
    
```

Figura 132. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Incineración 3 (Elaboración propia)

• **Alternativa de vertido**

Se introduce un valor nulo de impacto ambiental en los parámetros asociados a la alternativa de **vertido** de cada componente ( $EIL_1 = EIL_2 = EIL_3 = EIL_4 = 0$ ), mientras que las operaciones asociadas al resto de alternativas tienen un impacto ambiental positivo, comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es el **vertido de todos los componentes** del producto (**DISPOSAL**).

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBISH	REMANUFACTURE	
Prod1	100	500	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL	
Comp1	100	100	100	100	100	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Comp2	100	100	100	100	100	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Comp3	100	100	100	100	100	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Comp4	100	100	100	100	100	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 133. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Vertido 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.

MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb
Filename: RLTMBBDDamb.mpl
Date: May 27, 2019
Time: 11:38
Parsing time: 4.11 sec
MPL version: 5.0.8.116

Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 500.000000000
MIP best bound: 400.000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101

Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT

Optimal integer solution found

MIN EnvironmentalImp = 500.0000
    
```

**Figura 134.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Vertido 1 (Elaboración propia)

La sensibilidad del modelo se analiza al reducir el impacto ambiental asociado a la alternativa de **vertido** para cada componente ( $EIL_1 = EIL_2 = EIL_3 = EIL_4 = 24$ ), respecto al resto de alternativas. Se comprueba como el programa sigue eligiendo el vertido como la mejor alternativa para todos los componentes.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	100	500	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	24	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	24	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	24	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	24	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

**Figura 135.** BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Vertido 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBDDamb
Filename:          RLTMBDDamb.mpl
Date:              July 5, 2019
Time:              10:30
Parsing time:      3.34 sec
MPL version:       5.0.8.116
Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   596.000000000
MIP best bound:    496.000000000
Integer nodes:     0
Improving nodes:   0
Iterations:        0
Solution time:     0.01 sec
Solver result:     Optimal integer solution found
Result code:       101

Constraints:       4
Variables:         20
Integers:          20
Nonzeros:          32
Density:           40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
  MIN EnvironmentalImp =      596.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE DIS[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
DISProCom           1.0000
DISProCom           1.0000
DISProCom           1.0000
DISProCom           1.0000
    
```

Figura 136. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Vertido 2 (Elaboración propia)

Para comprobar que el programa deja de seleccionar el vertido como la mejor alternativa de todos los componentes, se introduce un valor de impacto ambiental ligeramente superior al resto de alternativas ( $EIL_1=EIL_2=EIL_3=EIL_4=26$ ), seleccionando en este caso otra alternativa diferente.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI!	REMANU
Prod1	100	500	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	26	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	26	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	26	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	26	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 137. BBDD del modelo matemático ambiental para la alternativa de Vertido 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb
Filename:          RLTMBBDDamb.mpl
Date:              July 5, 2019
Time:              10:35
Parsing time:      2.98 sec
MPL version:       5.0.8.116

Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   600.00000000
MIP best bound:    500.00000000
Integer nodes:     0
Improving nodes:   0
Iterations:        0
Solution time:     0.00 sec
Solver result:     Optimal integer solution found
Result code:       101

Constraints:       4
Variables:         20
Integers:          20
Nonzeros:          32
Density:           40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIP EnvironmentalImp = 600.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REUPro              1.0000
    
```

Figura 138. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la alternativa de Vertido 3 (Elaboración propia)

- **Heterogeneidad en las alternativas de componentes**

Igual que sucedía en los valores económicos, el sistema cuenta con la potestad de poder otorgar una alternativa de disposición diferente para los distintos componentes del producto. De esta manera, si reducimos los valores ambientales específicos de los componentes, de forma que para cada componente reducimos los valores correspondientes a una alternativa distinta (Comp1 –  $EIP4=0$ , Comp2 –  $EIR=0$ , Comp3 –  $EII=0$ , Comp4 –  $EIL=0$ ), el sistema indica como alternativa más adecuada para cada componente, aquellas con un valor menor, siendo diferente para cada componente (Comp1 – *CANNIBALIZATION*, Comp2 – *RECYCLE*, Comp3 – *BURNING*, Comp4 – *DISPOSAL*).

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBISH	REMANUFACTURE
Prod1	100	500	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	0	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	0	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	0	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 139. BBDD del modelo matemático ambiental con heterogeneidad en las alternativas de los componentes (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverselogisticTreatmentModelBBDDamb
Filename: RLTHBDDamb.mpl
Date: July 5, 2019 Time: 10:40
Parsing time: 2.98 sec MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 500.000000000 NIP best bound: 400.000000000
Integer nodes: 0 Improving nodes: 0 Iterations: 0 Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101 Constraints: 4 Variables: 20
Integers: 20 Nonzeros: 32 Density: 40 %
SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp = 500.0000
DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
Variable Name Activity
CANProCon 1.0000
CANProCon -
CANProCon -
CANProCon -
VARIABLE REG[i,j] :
Variable Name Activity
REGProCon -
REGProCon 1.0000
REGProCon -
REGProCon -
VARIABLE BUR[i,j] :
Variable Name Activity
BURProCon -
BURProCon -
BURProCon 1.0000
BURProCon -
VARIABLE DIS[i,j] :
Variable Name Activity
DISProCon -
DISProCon -
DISProCon -
DISProCon 1.0000
    
```

**Figura 140.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental con heterogeneidad en las alternativas de los componentes (Elaboración propia)

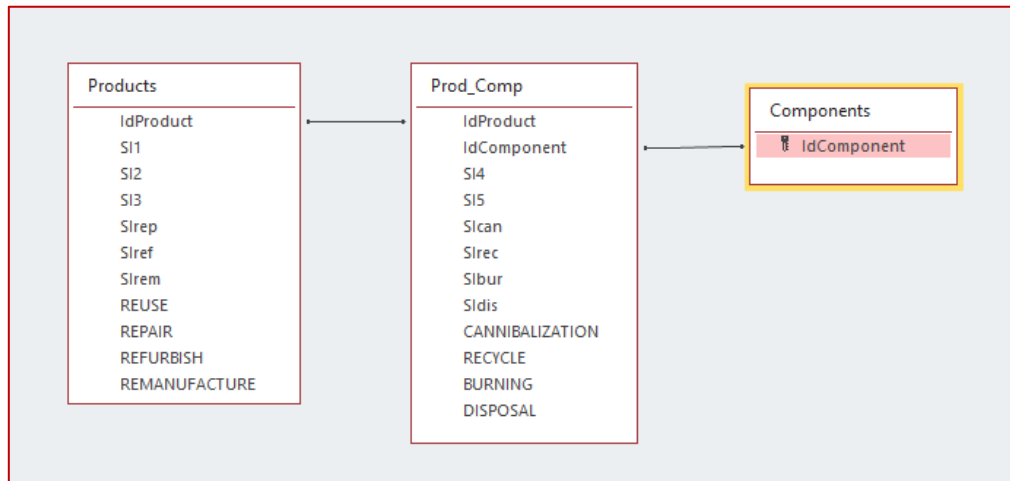
### 11.3.1.3. Función objetivo social

A través de la función objetivo de los aspectos sociales, se obtiene como la mejor alternativa de disposición aquella que maximiza el impacto social. Para ello, se compara el valor del impacto social asociado a cada alternativa y se escoge aquella alternativa que aporta el valor más alto.

El programa MPL contiene el modelo social descrito en el capítulo 9, donde se recoge la función objetivo social y todas las posibles alternativas como variables de decisión. Además, incluye todos los parámetros sobre el impacto social asociados a las alternativas (Ver Anexo 11.5.3). Dentro del modelo se hace referencia a la conexión con la BBDD social (*RLTMambsoc.mdb*) donde se incluyen los valores correspondientes a los parámetros, relacionados según la tabla de relaciones expuesta en la Figura 141.

Debido a que el parámetro del factor regional no es reconocido por el software MPL, se sustituye el producto de los parámetros sociales de mano de obra por el factor regional ( $W*\mu$ ) por un parámetro llamado “SI”, de manera que el parámetro  $W1*\mu1$  pasa a llamarse SII en la BBDD y en el modelo MPL, simplificando así también su manejo.





**Figura 141.** Diagrama de relaciones del modelo matemático social (Elaboración propia)

La BBDD conectada con el modelo matemático social está compuesta por tres tablas que, igual que en las funciones matemáticas anteriores, la tabla **“Products”** contiene los parámetros y las opciones de disposición referentes a las alternativas que trabajan el producto en su conjunto, la tabla **“Prod\_Comp”** contiene los parámetros y las alternativas que tratan de aprovechar los componentes y la tabla **“Components”** indica los componentes que tiene cada producto.

Como se aprecia en la siguiente figura (Figura 142), en el margen izquierdo de ambas tablas se introducen los parámetros correspondientes al impacto ambiental de las operaciones relacionadas según las alternativas de disposición (cuadros verdes) y en el margen derecho se muestran las alternativas de disposición (cuadros azules).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	1000	1000	0	0	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

IdCompone	SI4	SI5	Sican	Sirec	Sibur	Sldis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 142.** Estructura de los parámetros de la BBDD del modelo matemático social (Elaboración propia)

A continuación, se validará el modelo matemático comprobando que selecciona la alternativa más adecuada en base a la batería de datos introducida. Para comprobar que el modelo escoge la alternativa más adecuada, socialmente hablando, se introducen **valores de impacto social muy elevados en la alternativa a comprobar en cuestión,**

con respecto al resto de alternativas, forzando así al modelo a seleccionar dicha alternativa.

Además, para cada alternativa, se realizará un pequeño análisis de sensibilidad en dos fases. En primer lugar, se reduce la diferencia entre el impacto social de la alternativa a seleccionar y el resto de las **alternativas en 1 unidad, a favor de la primera**, y se comprueba que el programa la sigue seleccionando. En segundo lugar, se reduce aún más la diferencia de forma que el valor del **impacto social de la primera alternativa es inferior al resto**, comprobando como en ese escenario el programa ya no selecciona dicha alternativa como óptima.

- **Alternativa de reutilización**

Se introduce un valor en los parámetros de impacto social, asociados a la alternativa de reutilización, más elevado que el resto de las alternativas ( $SI1 = SI2 = 1000$ ). Además, puesto que la alternativa de reutilización no tiene parámetro propio de impacto social, se pone un valor negativo en el parámetro asociado al resto de alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado ( $SI3 = -100$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es la reutilización del producto (**REUSE**).

El resto de las alternativas que intervienen sobre el producto en su conjunto contienen un valor de impacto social ( $SIrep$ ,  $SIref$  y  $SIrem$ ) de 1900 puntos.

IdProduct	SI1	SI2	SI3	SIrep	SIref	SIrem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	1000	1000	-100	0	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	SIcar	SIrex	SIbu	SIdis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 143. BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reutilización 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamsoc
Filename:          RLTHBBDDamsoc.mpl
Date:              August 22, 2020
Time:              07:23
Parsing time:      3.29 sec
MPL version:       5.0.8.116

Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   2000.00000000
MIP best bound:    1000.00000000
Integer nodes:     0
Improving nodes:   0
Iterations:        0
Solution time:     0.00 sec
Solver result:     Optimal integer solution found
Result code:       101

Constraints:       4
Variables:         20
Integers:          20
Nonzeros:          32
Density:           40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 2000.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[i] :
Variable Name      Activity
-----
REUPro             1.0000
    
```

**Figura 144.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reutilización 1 (Elaboración propia)

La sensibilidad del modelo se analiza al reducir en una unidad el impacto ambiental asociado a la alternativa de reutilización con respecto al resto de alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado ( $SI3 = -1$ ). Se comprueba como el programa sigue eligiendo la reutilización como la mejor alternativa.

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	1000	1000	-1	0	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sirear	Sirecr	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 145.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reutilización 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamsoc
Filename:         RLTHBBDDamsoc.mpl
Date:            August 22, 2020
Time:            07:30
Parsing time:    3.04 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  2000.00000000
MIP best bound:  1000.00000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.01 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:     4
Variables:       20
Integers:        20
Nonzeros:        32
Density:         40 %
SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 2000.0000
DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[i] :

Variable Name      Activity
-----
REUPro              1.0000
    
```

**Figura 146.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reutilización 2 (Elaboración propia)

Asimismo, se puede validar el modelo comprobando cómo deja de ser la alternativa seleccionada si aumentamos el valor del impacto social del resto de alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado por encima de la reutilización ( $SI3 = 1$ ).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	1000	1000	1	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	SIcat	Sirec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 147.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reutilización 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBDDamboc
Filename:          RLTHBDDamboc.mpl
Date:              August 22, 2020
Time:              07:34
Parsing time:      2.00 sec
MPL version:       5.0.8.116

Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   2001.00000000
MIP best bound:    1001.00000000
Integer nodes:     0
Improving nodes:  0
Iterations:        0
Solution time:     0.00 sec
Solver result:     Optimal integer solution found
Result code:       101

Constraints:       4
Variables:         20
Integers:          20
Nonzeros:          32
Density:           40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 2001.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REP[i] :
Variable Name      Activity
-----
REPPro             1.0000
    
```

**Figura 148.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reutilización 3 (Elaboración propia)

- **Alternativa de reparación**

Se introduce un valor de impacto social asociado a la alternativa de reparación más elevado que el resto de las alternativas (**SIrep =1000**), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es la reparación del producto (**REPAIR**).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	SIrep	SIref	SIrem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	1000	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	SIca	SIre	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 149.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reparación 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.

MODEL STATISTICS

Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDanbsoc
Filename:          RLTMBBDDanbsoc.mpl
Date:              August 22, 2020
Time:              07:46
Parsing time:      2.66 sec
MPL version:       5.0.8.116

Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   1300.00000000
MIP best bound:    1200.00000000
Integer nodes:     0
Improving nodes:   0
Iterations:        0
Solution time:     0.00 sec
Solver result:     Optimal integer solution found
Result code:       101

Constraints:       4
Variables:         20
Integers:          20
Nonzeros:          32
Density:           40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 1300.0000
DECISION VARIABLES

VARIABLE REP[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REPPro              1.0000
    
```

**Figura 150.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reparación 1 (Elaboración propia)

Analizando la sensibilidad de la herramienta, se comprueba que sigue dando la misma solución cuando el impacto social de la alternativa de reparación tiene tan solo un punto más que las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (*SIrep=601*).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	SIrep	SIref	SIrem	REUSE	REPAIR	REFURBI!	REMANUF
Prod1	100	100	100	601	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	SIcar	SIrec	SIbu	SIdis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 151.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reparación 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BDDdamsoc
Filename:         RLTMDDdamsoc.mpl
Date:            August 22, 2020
Time:            07:57
Parsing time:    2.83 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  901.000000000
MIP best bound:  801.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:     4
Variables:      20
Integers:       20
Nonzeros:      32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
  MAX SocialImpact = 901.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REP[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REPPro             1.0000
    
```

**Figura 152.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reparación 2 (Elaboración propia)

Para comprobar que el programa deja de seleccionar la reparación como la mejor alternativa, se reduce, respecto al caso anterior, en una unidad el impacto social del proceso de reparación ( $S_{rep}=600$ ) para optar por otra alternativa diferente.

IdProduct	SI1	SI2	SI3	S <sub>rep</sub>	S <sub>ref</sub>	S <sub>rem</sub>	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	600	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	S <sub>car</sub>	S <sub>ret</sub>	S <sub>bu</sub>	S <sub>dis</sub>	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 153.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reparación 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamsoc
Filename:         RLTHBDDamsoc.mpl
Date:            August 22, 2020
Time:           08:03
Parsing time:    3.67 sec
MPL version:    5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  900.000000000
MIP best bound:  800.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:     4
Variables:       20
Integers:        20
Nonzeros:        32
Density:         40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 900.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
Variable Name      Activity
-----
CANProCon          1.0000
CANProCon          1.0000
CANProCon          1.0000
CANProCon          1.0000
    
```

Figura 154. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reparación 3 (Elaboración propia)

- **Alternativa de reacondicionamiento**

Se introduce un valor de impacto social asociado a la alternativa de reacondicionamiento más elevado que el resto de las alternativas ( $SI_{ref}=1000$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es el reacondicionamiento del producto (**REFURBISH**).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	SIref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	1000	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	SIcar	Sirec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 155. BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reacondicionamiento 1 (Elaboración propia)



```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBDDdbmsoc
Filename:         RLIMBDDdbmsoc.mpl
Date:            August 22, 2020
Time:            08:11
Parsing time:    3.12 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  1300.00000000
MIP best bound:  1200.00000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:     4
Variables:       20
Integers:        20
Nonzeros:        32
Density:         40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 1300.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REF[i] :

-----
Variable Name      Activity
-----
REFPro              1.0000
-----
    
```

**Figura 156.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reacondicionamiento 1 (Elaboración propia)

Analizando la sensibilidad de la herramienta, se comprueba que sigue dando la misma solución cuando el impacto social de la alternativa de reacondicionamiento tiene tan solo un punto más que las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes ( $S_{Iref}=601$ ).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	601	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sicat	Sirec	Sibu	Sidi	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 157.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reacondicionamiento 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBDDdamsoc
Filename:         RLTHBDDdamsoc.mpl
Date:            August 22, 2020
Time:            08:18
Parsing time:    3.19 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  901.000000000
MIP best bound:  801.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:     4
Variables:      20
Integers:       20
Nonzeros:      32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 901.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REF[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REFPro             1.0000
-----
    
```

**Figura 158.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reacondicionamiento 2 (Elaboración propia)

Para comprobar que el programa deja de seleccionar el reacondicionamiento como la mejor alternativa, se reduce, respecto al caso anterior, en una unidad el impacto social del proceso de reacondicionamiento ( $SI_{ref} = 600$ ) para optar por otra alternativa diferente.

IdProduct	SI1	SI2	SI3	SIrep	SIref	SIrem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	600	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	SIcar	SIret	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 159.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reacondicionamiento 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentMode1BDDamsoc
Filename: RLTHBDDamsoc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 08:20
Parsing time: 2.75 sec
MPL version: 5.0.8.116

Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 900.000000000
MIP best bound: 800.000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101

Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 900.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
Variable Name Activity
-----
CANProCom 1.0000
CANProCom 1.0000
CANProCom 1.0000
CANProCom 1.0000
    
```

**Figura 160.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reacondicionamiento 3 (Elaboración propia)

- **Alternativa de remanufacturación**

Se introduce un valor de impacto social asociado a la alternativa de remanufacturación más elevado que el resto de las alternativas ( $S_{irem} = 1000$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa es la remanufacturación del producto (**REMANUFACTURE**).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	1000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sicat	Siret	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 161.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Remanufacturación 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamsoc
Filename:         RLTHBDDDamsoc.mpl
Date:            August 22, 2020
Time:            08:25
Parsing time:    2.98 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  1300.00000000
MIP best bound:  1200.00000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:    Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:     4
Variables:      20
Integers:       20
Nonzeros:      32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 1300.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REM[i] :
Variable Name      Activity
-----
REHPro             1.0000
    
```

**Figura 162.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Remanufacturación 1 (Elaboración propia)

Analizando la sensibilidad de la herramienta, se comprueba que sigue dando la misma solución cuando el impacto social de la alternativa de remanufacturación tiene tan solo un punto más que las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (*SIrem=601*).

dProduct	SI1	SI2	SI3	SIrep	SIref	SIrem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
rod1	100	100	100	100	100	601	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	SIcar	SIrec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 163.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Remanufacturación 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamsoc
Filename:         RLTHBDDamsoc.mpl
Date:            August 22, 2020
Time:            08:29
Parsing time:    3.30 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  901.000000000
MIP best bound:  801.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:      4
Variables:        20
Integers:         20
Nonzeros:         32
Density:          40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 901.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REM[i] :

-----
Variable Name      Activity
-----
REMPro              1.0000
-----
    
```

**Figura 164.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Remanufacturación 2 (Elaboración propia)

Para comprobar que el programa deja de seleccionar la remanufacturación como la mejor alternativa, se reduce, respecto al caso anterior, en una unidad el impacto social del proceso de remanufacturación ( $SIrem = 600$ ) para optar por otra alternativa diferente.

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	SIrem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	600	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	SIcar	Sirec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 165.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Remanufacturación 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBDDambsoc
Filename: RLTHBDDambsoc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 08:32
Parsing time: 3.66 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 900.000000000
MIP best bound: 800.000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101

Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 900.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :

Variable Name      Activity
-----
CANProCon          1.0000
CANProCon          1.0000
CANProCon          1.0000
CANProCon          1.0000
    
```

Figura 166. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Remanufacturación 3 (Elaboración propia)

• **Alternativa de canibalización**

Se introduce un valor de impacto social, asociado al parámetro específico de canibalización de cada componente, más elevado que el resto de las alternativas ( $Sican_1 = Sican_2 = Sican_3 = Sican_4 = 250$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa para cada componente es la canibalización (**CANNIBALIZATION**).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sicar	Sirec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	250	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	250	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	250	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	250	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 167. BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Canibalización 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBDDambsoc
Filename:      RLTMBBDDambsoc.mpl
Date:         August 22, 2020
Time:         08:36
Parsing time: 3.32 sec
MPL version:  5.0.8.116
Solver name:  CPLEX (11.2.1)
Objective value: 1500.00000000
MIP best bound: 1400.00000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations:   0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code:  101

Constraints:   4
Variables:    20
Integers:     20
Nonzeros:     32
Density:      40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 1500.0000

DECISION VARIABLES
-----
VARIABLE CAN[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
    
```

**Figura 168.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Canibalización 1 (Elaboración propia)

Analizando la sensibilidad de la herramienta, se comprueba que sigue dando la misma solución cuando el impacto social de la alternativa de canibalización tiene tan solo un punto más que el resto de las alternativas ( $Sican_1 = Sican_2 = Sican_3 = Sican_4 = 101$ ).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sicar	Sirec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	101	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	101	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	101	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	101	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 169.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Canibalización 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.

MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BBDDamsoc
Filename:         RL1BBDDamsoc.mpl
Date:            August 22, 2020
Time:            08:39
Parsing time:     2.93 sec
MPL version:     5.0.8.116
Solver name:     CPLEX (11.2.1)
Objective value:  904.000000000
MIP best bound:  804.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101
Constraints:     4
Variables:      20
Integers:       20
Nonzeros:       32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 904.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :

Variable Name      Activity
-----
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
    
```

Figura 170. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Canibalización 2 (Elaboración propia)

Asimismo, se puede validar el modelo comprobando cómo deja de ser la alternativa seleccionada si reducimos el valor del impacto social para la alternativa de cada componente por debajo del resto de alternativas ( $SI_{can1} = SI_{can2} = SI_{can3} = SI_{can4} = 99$ ).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	SIcar	Sirex	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	99	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	99	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	99	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	99	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 171. BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Canibalización 3 (Elaboración propia)



```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBDDamboc
Filename: RLTHBDDamboc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 08:44
Parsing time: 2.96 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 900.000000000
MIP best bound: 800.000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 900.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REC[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
RECProCom          1.0000
RECProCom          1.0000
RECProCom          1.0000
RECProCom          1.0000
    
```

Figura 172. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Canibalización 3 (Elaboración propia)

• **Alternativa de reciclaje**

Se introduce un valor de impacto social, asociado al parámetro específico de la alternativa de reciclaje de cada componente, más elevado que el resto de las alternativas ( $Sirec_1=Sirec_2=Sirec_3=Sirec_4=250$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa para cada componente es el reciclaje (**RECYCLE**).

IdProduct	S11	S12	S13	S1rep	S1ref	S1rem	REUSE	REPAIR	REFURBI!	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	S14	S15	S1car	S1rec	S1bu	S1dis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	250	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	250	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	250	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	250	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 173. BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reciclaje 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentNode1BDDamboc
Filename: ALTHBDDamboc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 08:50
Parsing time: 2.86 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 1500.00000000
NIP best bound: 1400.00000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 1500.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REC[i,j] :

Variable Name      Activity
-----
RECProCon          1.0000
RECProCon          1.0000
RECProCon          1.0000
RECProCon          1.0000
    
```

**Figura 174.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reciclaje 1 (Elaboración propia)

Analizando la sensibilidad de la herramienta, se comprueba que sigue dando la misma solución cuando el impacto social de la alternativa de reciclaje tiene tan solo un punto más que el resto de las alternativas ( $S_{rec1}=S_{rec2}=S_{rec3}=S_{rec4}=101$ ).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Srep	Sref	Srem	REUSE	REPAIR	REFURBI!	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sica	Srefc	Sisu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	101	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	101	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	101	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	101	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 175.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reciclaje 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamboc
Filename: RLTMBBDDamboc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 08:52
Parsing time: 3.01 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 904.000000000
MIP best bound: 804.000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 904.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REC[i,j] :
Variable Name Activity
-----
RECProCom 1.0000
RECProCom 1.0000
RECProCom 1.0000
RECProCom 1.0000
-----
    
```

Figura 176. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reciclaje 2 (Elaboración propia)

Asimismo, se puede validar el modelo comprobando cómo deja de ser la alternativa seleccionada si reducimos el valor del impacto social para la alternativa de reciclaje de cada componente por debajo del resto de alternativas ( $SIrec_1=SIrec_2=SIrec_3=SIrec_4=99$ ).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	SIcar	SIrec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	99	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	99	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	99	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	99	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 177. BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Reciclaje 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBBDDambsoc
Filename: RLTHBDDambsoc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 08:55
Parsing time: 3.31 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 900.000000000
MIP best bound: 800.000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 900.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
CANProCon          1.0000
CANProCon          1.0000
CANProCon          1.0000
CANProCon          1.0000
    
```

Figura 178. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Reciclaje 3 (Elaboración propia)

- **Alternativa de incineración**

Se introduce un valor de impacto social, asociado al parámetro específico de la alternativa de incineración de cada componente, más elevado que el resto de las alternativas ( $Sibur_1=Sibur_2=Sibur_3=Sibur_4=250$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa para cada componente es la incineración (**BURNING**).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sicar	Sirec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	250	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	250	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	250	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	250	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 179. BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Incineración 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverselogisticTreatmentModelBBDDanbsoc
Filename: RLTHBDDanbsoc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 08:59
Parsing time: 2.58 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 1500.0000000
MIP best bound: 1400.0000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 1500.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE BUR[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
BURProCon          1.0000
BURProCon          1.0000
BURProCon          1.0000
BURProCon          1.0000
    
```

Figura 180. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Incineración 1 (Elaboración propia)

Analizando la sensibilidad de la herramienta, se comprueba que sigue dando la misma solución cuando el impacto social de la alternativa de incineración tiene tan solo un punto más que el resto de las alternativas ( $Sibur_1=Sibur_2=Sibur_3=Sibur_4=101$ ).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sicar	Sirec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	101	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	101	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	101	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	101	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 181. BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Incineración 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDanbsoc
Filename:         RLTMBBDDanbsoc.mpl
Date:            August 22, 2020
Time:            09:09
Parsing time:     2.86 sec
MPL version:      5.0.8.116
Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  904.000000000
MIP best bound:  804.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101
Constraints:     4
Variables:       20
Integers:       20
Nonzeros:       32
Density:        40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 904.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE BUR[i,j] :

-----
Variable Name      Activity
-----
BURProCom          1.0000
BURProCom          1.0000
BURProCom          1.0000
BURProCom          1.0000
    
```

**Figura 182.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Incineración 2 (Elaboración propia)

Asimismo, se puede validar el modelo comprobando cómo deja de ser la alternativa seleccionada si reducimos el valor del impacto social para la alternativa de incineración de cada componente por debajo del resto de alternativas ( $Sibur_1=Sibur_2=Sibur_3=Sibur_4=99$ ).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sicar	Siret	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	99	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	99	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	99	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	99	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 183.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Incineración 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.

MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamsoc
Filename: RLTHBDDamsoc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 09:15
Parsing time: 3.31 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 900.000000000
MIP best bound: 800.000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 900.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
    
```

**Figura 184.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Incineración 3 (Elaboración propia)

- **Alternativa de vertido**

Se introduce un valor de impacto social, asociado al parámetro específico de la alternativa de vertido de cada componente más elevado que el resto de las alternativas ( $SI_{dis1}=SI_{dis2}=SI_{dis3}=SI_{dis4}=250$ ), comprobando como el modelo indica claramente que la mejor alternativa para cada componente es el vertido (**DISPOSAL**).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sicar	Sirec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	250	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	250	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	250	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	250	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

**Figura 185.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Vertido 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentMode1BBDDambsoc
Filename:      RTMBBDDambsoc.mpl
Date:         August 22, 2020
Time:         09:06
Parsing time: 3.70 sec
MPL version:  5.0.8.116
Solver name:  CPLEX (11.2.1)
Objective value: 1500.00000000
MIP best bound: 1400.00000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 1500.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE DIS[i,j] :

-----
Variable Name      Activity
-----
DISProCom          1.0000
DISProCom          1.0000
DISProCom          1.0000
DISProCom          1.0000
-----
    
```

**Figura 186.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Vertido 1 (Elaboración propia)

Analizando la sensibilidad de la herramienta, se comprueba que sigue dando la misma solución cuando el impacto social de la alternativa de vertido tiene tan solo un punto más que el resto de las alternativas ( $SIdis_1=SIdis_2=SIdis_3=SIdis_4=101$ ).

IdProduct	S11	S12	S13	S1rep	S1ref	S1rem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	S14	S15	S1car	S1rer	S1bu	S1dis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	101	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	101	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	101	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	101	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

**Figura 187.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Vertido 2 (Elaboración propia)



```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.

MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBDDambsoc
Filename: RLTHBDDambsoc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 09:12
Parsing time: 4.05 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 904.00000000
MIP best bound: 804.00000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 904.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE DIS[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
DISProCom          1.0000
DISProCom          1.0000
DISProCom          1.0000
DISProCom          1.0000
    
```

**Figura 188.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Vertido 2 (Elaboración propia)

Asimismo, se puede validar el modelo comprobando cómo deja de ser la alternativa seleccionada si reducimos el valor del impacto social para la alternativa de vertido de cada componente por debajo del resto de alternativas ( $SI_{dis1}=SI_{dis2}=SI_{dis3}=SI_{dis4}=99$ ).

IdProduct	Sireu	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBISH	REMANUFACTURE
Prod1	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	Sican	Sirec	Sibur	SI <sub>dis</sub>	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	25	25	25	24	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	25	25	25	24	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	25	25	25	24	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	25	25	25	24	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 189.** BBDD del modelo matemático social para la alternativa de Vertido 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamboc
Filename: RLTHBDDamboc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 09:18
Parsing time: 2.95 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 900.000000000
MIP best bound: 800.000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 900.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
    
```

Figura 190. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la alternativa de Vertido 3 (Elaboración propia)

- **Heterogeneidad en las alternativas de componentes**

Igual que sucedía en los valores económicos y ambientales, el sistema puede otorgar una alternativa de disposición diferente para los distintos componentes del producto. De esta manera, si aumentamos los valores sociales de los componentes para que cada uno cuente con una alternativa diferentes como óptima (Comp1 – *Sican*, Comp2 – *Sirec*, Comp3 – *Sibur* y Comp4 – *Sidis*), el sistema indica las alternativas más adecuadas según dichos valores (Comp1 – *CANNIBALIZATION*, Comp2 – *RECYCLE*, Comp3 – *BURNING* y Comp4 – *DISPOSAL*).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sicar	Sirec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	1000	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	1000	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	1000	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	1000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 191. BBDD del modelo matemático social con heterogeneidad en las alternativas de componentes (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModel18800dambsoc
Filename:         RLTH8800dambsoc.mpl
Date:            August 22, 2020
Time:            09:20
Parsing time:     3.35 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  4500.00000000
MIP best bound:  4400.00000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:     4
Variables:       20
Integers:        20
Nonzeros:        32
Density:         40 %

SOLUTION RESULT

Optimal integer solution found

MAX SocialImpact = 4500.0000
    
```

```

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
CANProCom          1.0000
CANProCom          -
CANProCom          -
CANProCom          -
-----
VARIABLE REC[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
RECProCom          -
RECProCom          1.0000
RECProCom          -
RECProCom          -
-----
VARIABLE BUR[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
BURProCom          -
BURProCom          -
BURProCom          1.0000
BURProCom          -
-----
VARIABLE DIS[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
DISProCom          -
DISProCom          -
DISProCom          -
DISProCom          1.0000
-----
    
```

**Figura 192.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social con heterogeneidad en las alternativas de componentes (Elaboración propia)

### 11.3.1.4. Casos especiales

Como se ha podido apreciar, en algunos de los ejemplos anteriores, pueden darse casos en los que varias alternativas den el mismo resultado y, por tanto, cabe validar también el comportamiento del modelo analizando esos casos especiales.

Tomando como referencia el modelo de aspectos sociales, si se cuantifican todas las alternativas para que den el mismo valor ( $SI_{reu} = SI_{rep} = SI_{ref} = SI_{rem} = \sum SI_{can} = \sum SI_{rec} = \sum SI_{bur} = \sum SI_{dis}$ ), el resultado del sistema sería el siguiente:

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	600	600	600	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	SIcar	Sirec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 193. BBDD del modelo matemático social con casos especiales 1 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.

MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentMode1BBDDamsoc
Filename: RLTHBBDDamsoc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 09:25
Parsing time: 2.75 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 900.00000000
MIP best bound: 800.00000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 900.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :

Variable Name      Activity
-----
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
    
```

Figura 194. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social con casos especiales 1 (Elaboración propia)

Se observa que, en el caso de que todas las alternativas den el mismo resultado, la alternativa escogida es la canibalización, ya que el sistema primero hace un barrido por todas las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes y escoge el valor más elevado. Al empezar por la canibalización y no encontrar otra alternativa que ofrezca un resultado mejor, se queda con la primera opción escogida.

En el caso de que, por ejemplo, para un componente se le reduzca el valor del impacto social para la alternativa de canibalización (*S<sub>ican</sub>*), el programa selecciona la alternativa siguiente en el barrido de soluciones realizado, es decir, en vez de escoger la canibalización (*CANNIBALIZATION*) escoge el reciclaje (*RECYCLE*).

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Srep	Sref	Srem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	600	600	600	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sicar	Sirec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	99	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 195. BBDD del modelo matemático social con casos especiales 2 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamsoc
Filename: RLTHBDDamsoc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 09:49
Parsing time: 3.94 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 900.00000000
MIP best bound: 800.00000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %
SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 900.0000
DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
Variable Name Activity
CANProCom 1.0000
CANProCom 1.0000
CANProCom 1.0000
-----
VARIABLE REC[i,j] :
Variable Name Activity
RECProCom 1.0000
RECProCom .
RECProCom .
RECProCom .
-----
    
```

Figura 196. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social con casos especiales 2 (Elaboración propia)

Asimismo, si se reduce también el impacto social de la alternativa siguiente (*Sirec*) se observa que el programa selecciona la alternativa inmediatamente posterior a la evaluada, la incineración (*BURNING*), y así sucesivamente con todas las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes.

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Srep	Sref	Srem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	100	100	100	600	600	600	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sicar	Sirec	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	99	99	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	100	100	100	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 197. BBDD del modelo matemático social con casos especiales 3 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModel18BDDambsoc
Filename: RL18BDDambsoc.mpl
Date: August 22, 2020
Time: 10:00
Parsing time: 2.88 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 900.000000000
MIP best bound: 800.000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %
SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 900.0000
DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
Variable Name Activity
CANProCon .
CANProCon 1.0000
CANProCon 1.0000
CANProCon 1.0000
VARIABLE BUR[i,j] :
Variable Name Activity
BURProCon 1.0000
BURProCon .
BURProCon .
BURProCon .
    
```

**Figura 198.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social con casos especiales 3 (Elaboración propia)

En el primer caso especial analizado, se observa que el valor resultante con las alternativas escogidas de aprovechamiento de componentes coincide con el valor de las alternativas de tratamiento de producto en su conjunto con parámetro específico de impacto social ( $SI_{rep} = SI_{ref} = SI_{rem} = \sum SI_{can} = \sum SI_{rec} = \sum SI_{bur} = \sum SI_{dis}$ ). En el caso en el que la suma de los valores sociales de las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes ( $\sum SI_{can}, \sum SI_{rec}, \sum SI_{bur}, \sum SI_{dis}$ ) esté por debajo del resto de alternativas ( $SI_{rep}, SI_{ref}, SI_{rem}$ ), automáticamente el programa seleccionará la alternativa primera de tratamiento sobre el producto en su conjunto con parámetro específico de impacto social, es decir, la reparación (**REPAIR**).

IdProduct	SI1	SI2	SI3	SI <sub>rep</sub>	SI <sub>ref</sub>	SI <sub>rem</sub>	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
rod1	100	100	100	600	600	600	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	SI <sub>car</sub>	SI <sub>rec</sub>	SI <sub>bu</sub>	SI <sub>dis</sub>	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	100	100	100	100	100	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	100	100	99	99	99	99	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 199.** BBDD del modelo matemático social con casos especiales 4 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBDDsoc
Filename:         RLTMBDDsoc.mpl
Date:            July 5, 2019
Time:            12:20
Parsing time:     3.01 sec
MPL version:     5.0.8.116

Solver name:      CPLEX (11.2.1)
Objective value:  100.000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101

Constraints:      4
Variables:       20
Integers:        20
Nonzeros:        32
Density:         40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
  MAX SocialImpact = 100.0000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[i] :
  Variable Name      Activity
-----
  REUPro             1.0000
-----
    
```

**Figura 200.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social con casos especiales 4  
(Elaboración propia)

### 11.3.2. Validación del procedimiento de solución

En este apartado se valida el proceso de solución a seguir, expuesto en el capítulo 10 de la presente tesis. Para realizar la experimentación, se ha generado una batería de valores económicos, ambientales y sociales que sirven para explicar y validar el proceso de solución.

Para ello, se realizarán los cinco pasos del proceso de solución, en base al esquema mostrado en la Figura 62, comprobando que, efectivamente, se selecciona la alternativa más adecuada en cada caso.

#### 1. Establecimiento del Punto ideal.

Tal y como se aprecia en el apartado anterior, a través del programa MPL se obtiene la alternativa óptima para cada FO. Puesto que el modelo matemático utilizado cuenta con una triple FO, para cada ejemplo de aplicación se obtienen 3 alternativas de tratamiento ideales, cada una referente a una FO, económica, ambiental y social. Evidentemente, si las soluciones de las tres FO coincidiesen en la misma alternativa, se tendría identificada la mejor alternativa de disposición desde los tres pilares de la sostenibilidad. El problema viene en que, generalmente, las tres FO no convergen en la misma solución, por tanto, habrá que buscar la alternativa que aporte mejor

resultado, en su conjunto, para las tres FO. Este resultado será aquel que se encuentre más cerca del punto ideal.

La configuración del punto ideal viene dada por la composición de la solución objetivo de cada una de las tres funciones objetivo que componen el modelo matemático. Por ello, a continuación, se establece la solución objetivo de cada función, en base a una determinada batería de valores económicos, ambientales y sociales.

**a. Función Objetivo Económica.**

En la siguiente figura (Figura 201) se puede observar la base de datos de los valores económicos, donde se muestran los distintos valores de ingresos y gastos que afectan a cada alternativa.

Tras la aplicación del modelo matemático se puede observar cómo se elige la alternativa de remanufacturación, aportando un valor económico de **28'50**, según se puede apreciar en las figuras siguientes:

dProdt	Sre	Srep	Sref	Sren	Cas	Tr	Coll	Clean	InspS	Pack	Storag	Trans	Crep	Cref	Cren	REUSE	REPAI	REFUI	REMAN
Prod1	10	60	70	95	15	5	2,5	3	0,5	10	0,5	5	15	18	25	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
IdCompone	Sca	Sri	St	Lat	Storaj	Transpi	Ccar	Crec	Storaj	Tr	Cbl	Crm	Cdi	CANNIBALIZ	RECYCLE	BURNINC	DISPOSAL		
Comp1	0,5	2	0,2	0,15	0,1	0,1	0,25	1	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Comp2	15	10	0,5	1	0,25	0,1	7,5	5	0,3	0,15	0,25	0,1	0,3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Comp3	25	20	2	1,5	0,3	0,1	12,5	10	0,35	0,15	1	0,1	0,85	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Comp4	10	8	0,5	0,25	0,15	0,1	5	4	0,2	0,15	0,25	0,1	0,55	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

**Figura 201.** BBDD del modelo matemático económico para la validación del proceso de solución (Elaboración propia)



```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BBDD
Filename:         RLTMBBDDec.mpl
Date:            July 17, 2019
Time:            10:54
Parsing time:     2.64 sec
MPL version:     5.0.8.116
Solver name:     CPLEX (11.2.1)
Objective value: 28.5000000000
MIP best bound:  54.5000000000
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101
Constraints:     4
Variables:       20
Integers:        20
Nonzeros:        32
Density:         40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 28.5000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REM[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REMPro             1.0000
-----
    
```

**Figura 202.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico para la validación del proceso de solución (Elaboración propia)

**b. Función Objetivo Ambiental.**

En la siguiente figura (Figura 203) se puede observar la base de datos de los valores de impacto ambiental que afectan a cada alternativa. Tras la aplicación del modelo matemático, la alternativa de solución más adecuada que ofrece el sistema sería reciclar los componentes 1,2 y 4 y canibalizar el componente 3, aportando un valor de **24'50** puntos de impacto ambiental.

IdProduct	EIT1	EIT2	EIT3	EIP1	EIP2	EIP3	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANU
Prod1	10	15	12,5	12	15	18	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	EIT4	EIT5	EIP4	EIR	EII	EIL	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	2	1	3,5	0,5	15	18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	4	1,5	2	0,25	12	15	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	3,5	1,25	1,5	2,5	18	25	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	1,5	0,85	1,55	1,25	16	35	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 203.** BBDD del modelo matemático ambiental para la validación del proceso de solución (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.

MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb
Filename: RLTMBBDDamb.mpl
Date: July 17, 2019 Time: 10:59
Parsing time: 3.03 sec MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 24.5000000000
MIP best bound: 14.5000000000
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.01 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp = 24.5000
DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
Variable Name Activity
-----
CANProCom .
CANProCom .
CANProCom 1.0000
CANProCom .
-----
VARIABLE REC[i,j] :
Variable Name Activity
-----
RECProCom 1.0000
RECProCom 1.0000
RECProCom .
RECProCom 1.0000
    
```

Figura 204. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental para la validación del proceso de solución (Elaboración propia)

En este sentido, se puede observar que la alternativa más adecuada sería reciclar los componentes 1,2 y 4 y canibalizar el componente 3, aportando un valor de 24’50 puntos de impacto ambiental.

**c. Función Objetivo Social.**

En la siguiente figura (Figura 205) se puede observar la base de datos de los valores de impacto social de cada alternativa. Tras la aplicación del modelo matemático, la alternativa de solución más adecuada que ofrece el sistema sería la canibalización del componente 4 y la incineración de los componentes 1, 2 y 3, aportando un impacto social valorado en **109’50**.

IdProduct	SI1	SI2	SI3	Sirep	Siref	Sirem	REUSE	REPAIR	REFURBI	REMANUF
Prod1	1	1	2,5	3	4,5	2,5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IdCompone	SI4	SI5	Sicar	Siret	Sibu	Sidis	CANNIBALIZATION	RECYCLE	BURNING	DISPOSAL
Comp1	1	5	10	0,5	10,6	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	4	8,5	4	1,5	20,2	12,5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	4,5	1	1,5	4,25	35	1,5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp4	14	0,5	14,2	2,5	2,5	3,15	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 205. BBDD del modelo matemático social para la validación del proceso de solución (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModelBDDamboc
Filename: RLTHBDDamboc.mpl
Date: August 22, 2020 Time: 10:12
Parsing time: 2.90 sec MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 109.50000954
MIP best bound: 108.50000954
Integer nodes: 0 Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 20
Integers: 20
Nonzeros: 32
Density: 40 %
SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 109.5000
DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
Variable Name Activity
-----
CANProCom .
CANProCom .
CANProCom .
CANProCom 1.0000
-----
VARIABLE BUR[i,j] :
Variable Name Activity
-----
BURProCom 1.0000
BURProCom 1.0000
BURProCom 1.0000
BURProCom .
-----

```

Figura 206. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social para la validación del proceso de solución (Elaboración propia)

Recopilando las soluciones de las tres FO, se tendría lo siguiente:

FUNCIÓN OBJETIVO	ALTERNATIVA SELECCIONADA	VALOR ÓPTIMO
ECONÓMICA	REMANUFACTURA	28,5
AMBIENTAL	CANIBALIZACIÓN COMP3 - RECICLAJE COMP1, COMP2 Y COMP4	24,5
SOCIAL	CANIBALIZACIÓN COMP4 - INCINERACIÓN COMP1, COMP2 Y COMP3	109,5

Tabla 15. Alternativa seleccionada y valor óptimo para cada función objetivo (Elaboración propia).

A continuación, se presenta una tabla (Tabla 16), para representar las alternativas seleccionadas en cada función objetivo en forma de vector y así poder mostrarlo de manera más clara. En la primera columna se indican las tres funciones objetivo consideradas. También se pueden apreciar las ocho alternativas de tratamiento en columnas diferenciadas en dos grupos: alternativas de tratamiento de producto y alternativas de tratamiento de componentes.

Para cada una de las alternativas del primer grupo (Reutilización - REU, Reparación - REP, Reacondicionamiento - REF y Remanufacturación- REM) hay una sola columna en la que se introducirá un “1” si esa alternativa es la seleccionada para la función objetivo de la fila correspondiente o un “0” para el caso contrario. Sin embargo, para las alternativas de tratamiento de componentes (Canibalización- CAN, Reciclaje – REC, Incineración - BUR y Vertido - DIS) hay cuatro columnas que permiten indicar el tratamiento para cada componente, ya que en este caso se

consideran cuatro componentes. Al final de la tabla se incluye una columna para el valor óptimo que se ha obtenido en la solución de cada función objetivo.

De esta forma, para cada fila (función objetivo) se introduce en forma de vector la alternativa de solución, indicando un 1 en cada alternativa seleccionada para el producto o para cada componente. Obsérvese que en la Tabla 16 hay un “1” en la columna “REM” y en la fila “ECONÓMICA”, representando que la alternativa de solución para la función económica es la remanufacturación del producto. Los tres “1” que se indican en la tercera fila “SOCIAL” significan que la solución de la función objetivo social está compuesta por la incineración de los componentes 1, 2 y 3. En cambio el “0” del cuarto componente significa que no se debe incinerar sino canibalizar, como muestra el “1” de la columna de la alternativa de canibalización en la fila “social”.

FUNCIÓN OBJETIVO	ALTERNATIVA SELECCIONADA																VALOR ÓPTIMO										
	ALTERNATIVAS DE PRODUCTO				ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE COMPONENTES																						
	REU	REP	REF	REM	CAN				REC				BUR					DIS									
ECONÓMICA	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,50
AMBIENTAL	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,50
SOCIAL	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	109,50

**Tabla 16.** Alternativa seleccionada en forma de vector y valor óptimo para cada función objetivo (Elaboración propia).

Por tanto, el punto ideal estará formado por el conjunto de valores óptimos de cada FO que, en este caso, son.

FUNCIÓN OBJETIVO	ECONÓMICA	AMBIENTAL	SOCIAL
VALOR ÓPTIMO	28,5	24,5	109,5

**Tabla 17.** Valor óptimo para cada función objetivo (Elaboración propia).

## 2. Generación de valores de todas las alternativas posibles.

Teniendo en cuenta que el ejemplo está centrado en un producto con 4 componentes y que, para cada componente, independientemente del resto, puede haber 4 alternativas de disposición diferentes, el número total de alternativas posibles será de (nº de componentes ^ nº de alternativas)  $4^4 = 256$ . A esta cantidad, habrá que sumarle las posibles alternativas que son aplicables al producto en su conjunto, es decir, en total se contará con 260 posibles soluciones en forma de combinaciones de alternativas de disposición.

Por tanto, el siguiente paso será generar todas las posibles alternativas de solución y cuantificar para cada solución, el valor económico, ambiental y social. Para ello, con la ayuda de una macro de Microsoft Excel se generarán todas las posibles alternativas de componentes, a las que se añadirán las cuatro alternativas de intervención sobre el producto en su conjunto (Ver Anexos 11.5.4).

Una vez halladas todas las posibles alternativas, se obtiene el resultado de las tres FO para cada una de las alternativas, obteniendo un valor económico, ambiental y social en cada una (Ver Anexos 11.5.5).

### 3. Ponderación de aspectos.

El siguiente paso será marcar el peso correspondiente a cada uno de los objetivos. En base a la literatura científica, los aspectos económicos gozan del mayor porcentaje de importancia, mientras que los aspectos ambientales han ido cogiendo protagonismo en la última década. En cambio, los aspectos sociales han empezado a considerarse en la literatura científica de una forma bastante reciente. Para este ejemplo, se van a ponderar los tres aspectos según la importancia aproximada que se les otorga en los MCDM aplicados a la DD consultados en el EA, siendo así los pesos:

- Aspectos económicos: 60%
- Aspectos ambientales: 30%
- Aspectos sociales: 10 %

### 4. Grado de aproximación con respecto al punto ideal (DPIP)

Una vez establecidos los pesos correspondientes, se calcula el grado de aproximación del resultado de cada alternativa, ponderado según los pesos otorgados a cada factor, con respecto al punto ideal formado por los valores óptimos de cada alternativa, utilizando la fórmula siguiente:

$$DPIP_n = \sum_{j=1}^3 \left( W_j \left[ \frac{|f_j(n) - f_j^*|}{|f_j^*|} \right] \right)$$

Donde para cada alternativa  $f_j(n)$  se obtiene el grado de aproximación al punto ideal  $f_j^*$ , ponderado según la importancia del factor correspondiente  $W_j$ .

### 5. Selección de alternativa más próxima al punto ideal

En este último paso, se selecciona aquella alternativa que ofrece el menor valor DPIP, que es la que se encuentra más cerca del punto ideal.

En base al ejemplo seguido, los valores de DPIP para las alternativas de tratamiento de productos en su conjunto y las ocho primeras alternativas de tratamiento de componentes se muestran a continuación (se puede observar toda la tabla completa en el Anexo 11.5.5). De todos los valores, se han graduado los resultados en base a los colores rojo y verde, en rojo los valores más bajos y en verde los valores más elevados. Se destaca el menor valor (0'48) como el correspondiente a la **alternativa de remanufacturación (REM)**.

REU	REP	REF	REM	CAN				REC				BUR				DIS				DPIP	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,37
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,93
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,93
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,48
0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,38
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,50
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1,58
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1,81
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,57
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1,50
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1,61
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,69
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1,77
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2,00

**Tabla 18.** Valor de DPIP para las alternativas de tratamiento de productos y las primeras ocho alternativas de tratamiento de componentes (Elaboración propia).

Evidentemente, si se hubiese optado por otra distribución de pesos entre los aspectos, el resultado podría haber cambiado. Veamos qué ocurre con los siguientes valores

- Aspectos económicos: 20%
- Aspectos ambientales: 70%
- Aspectos sociales: 10 %

En este nuevo escenario, el resultado más bajo corresponde al reciclaje de los componentes 1 y 2 y la canibalización de los componentes 3 y 4, como se puede apreciar a continuación: (La tabla completa se encuentra en el Anexo 11.5.6)

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

REU	REP	REF	REM	CAN				REC				BUR				DIS				DPIP	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1,44
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1,66
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1,72
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	2,27
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1,93
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	2,48
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1,81
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	2,36
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	2,02
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	2,57
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,54
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,71
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,82
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,89

Tabla 19. Valor de DPIP para las tres mejores alternativas con indicación sobre la mejora alternativa de disposición (Elaboración propia).

En base a los resultados obtenidos en ambos escenarios, se puede apreciar como varían las soluciones ofrecidas en cada caso.

### 11.4. Conclusiones

En este capítulo se ha validado el Bloque II del MR-DIMPM-LI, correspondiente a la herramienta matemática genérica. Para ello, se ha comprobado que, tanto el modelo matemático genérico, como el proceso de solución, escogen la alternativa más adecuada en cada caso.

La validación del modelo matemático se ha realizado comprobando que las tres funciones objetivo (económica, ambiental y social) son capaces de elegir todas y cada una de las alternativas en un escenario de valores favorable a cada una de ellas. Además, se ha comprobado como el modelo es capaz de aportar una alternativa de solución para el producto o para cada uno de los componentes, con la posibilidad de escoger una alternativa diferente para cada uno de ellos.

La validación del proceso de solución se ha desarrollado siguiendo los pasos del proceso expuestos en el capítulo anterior, comprobando cómo se escoge la alternativa más adecuada en cada momento. Además, se puede afirmar que la decisión, con respecto a los pesos de los aspectos de sostenibilidad, determina en gran medida la solución planteada. Este hecho da una visión sobre el grado de importancia de una buena elección de los pesos. Por ello, resulta interesante que dicha elección se realice de una forma consensuada, considerando además otros tipos de elementos que se escapan del ámbito de este estudio y que pueden ser específicos de cada caso, como la demanda, la flexibilidad del mercado, las oportunidades de venta ocasionales, etc.

Asimismo, resultará interesante plantear diferentes escenarios en cada caso concreto para observar la variación de la alternativa escogida en función de los parámetros obtenidos y de los pesos asignados a cada tipo de factor, incluso aportando una graduación de las mejores alternativas, ya no sólo la mejor, por conocer la trascendencia de la elección y ampliar el margen de maniobra en cada escenario concreto.

Los experimentos realizados han permitido descartar errores graves de funcionamiento del modelo y aseguran un funcionamiento lógico. Todo apunta, por lo tanto, a que se puede pasar a una fase de experimentación con datos reales. No obstante, no se puede asegurar todavía que el funcionamiento sea completamente perfecto. En este sentido, se extremarán las precauciones en los primeros experimentos con datos reales a fin de detectar y solventar lo antes posible cualquier anomalía.

## 11.5. Anexos

### 11.5.1. Anexo. Modelo Matemático de aspectos económicos en lenguaje MPL.

TITLE

ReverseLogisticTreatmentModelBBDD;

OPTIONS

DatabaseType=Access;

DatabaseAcces="RLTM.mdb";

INDEX

i := DATABASE ("Products", "IdProduct");

j := DATABASE ("Components", "IdComponent");

DATA

Sreu[i] := DATABASE ("Products", "Sreu");

Srep[i] := DATABASE ("Products", "Srep");

Sref[i] := DATABASE ("Products", "Sref");

Srem[i] := DATABASE ("Products", "Srem");

Scan[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Scan");

Srec[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Srec");

Sbur[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Sbur");



CP[i] := DATABASE ("Products", "CashPay");  
T1[i] := DATABASE ("Products", "Transport1");  
COL[i] := DATABASE ("Products", "Collect");  
CLE[i] := DATABASE ("Products", "Clean");  
InS[i] := DATABASE ("Products", "InspSort");  
P[i] := DATABASE ("Products", "Pack");  
S1[i] := DATABASE ("Products", "Storage1");  
T2[i] := DATABASE ("Products", "Transport2");  
Crep[i] := DATABASE ("Products", "Crep");  
Cref[i] := DATABASE ("Products", "Cref");  
Crem[i] := DATABASE ("Products", "Crem");  
L[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Label");  
S2[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Storage2");  
T3[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Transport3");  
Ccan[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Ccan");  
Crec[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Crec");  
S3[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Storage3");  
T4[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Transport4");  
Cbur[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Cbur");  
Crm[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Crm");  
Cdis[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Cdis");

VARIABLES

REU[i] EXPORT TO DATABASE ("Products", "REUSE");  
REP[i] EXPORT TO DATABASE ("Products", "REPAIR");  
REF[i] EXPORT TO DATABASE ("Products", "REFURBISH");  
REM[i] EXPORT TO DATABASE ("Products", "REMANUFACTURE");  
CAN[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp", "CANNIBALIZATION");  
REC[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp", "RECYCLE");

## PARTE IV. PROPUESTA.

### Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

---

BUR[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp" , "BURNING");

DIS[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp" , "DISPOSAL");

#### MACROS

IngMer := SUM(i: Sreu[i] \* REU + Srep[i] \* REP + Sref[i] \* REF + Srem[i] \* REM);

IngCom := SUM (i,j: Scan[i,j] \* CAN + Srec[i,j] \* REC);

IngInc := SUM (i,j: Sbur[i,j] \* BUR);

CSim := SUM(i: CP[i] + T1[i] + COL[i] + CLE[i] + InS[i]);

CmerREU := SUM(i: P[i] \* REU + S1[i] \* REU + T2[i] \* REU);

CmerREP := SUM(i: P[i] \* REP + S1[i] \* REP + T2[i] \* REP + Cref[i] \* REP);

CmerREF := SUM(i: P[i] \* REF + S1[i] \* REF + T2[i] \* REF + Cref[i] \* REF);

CmerREM := SUM(i: P[i] \* REM + S1[i] \* REM + T2[i] \* REM + Crem[i] \* REM);

CcomCAN := SUM (i,j: L[i,j] \* CAN + S2[i,j] \* CAN + T3[i,j] \* CAN + Ccan[i,j] \* CAN);

CcomREC := SUM (i,j: L[i,j] \* REC + S2[i,j] \* REC + T3[i,j] \* REC + Crec[i,j] \* REC);

CDesBUR := SUM (i,j: S3[i,j] \* BUR + T4[i,j]\* BUR + Cbur[i,j] \* BUR + Crm[i,j] \* BUR);

CDesDIS := SUM (i,j: S3[i,j]\* DIS + T4[i,j]\* DIS + Cdis[i,j] \* DIS);

#### MODEL

MAX Beneficio

EXPORT TO DATABASE ("Products" , "BENEFICIO")

= IngMer + IngCom + IngInc - CSim - CmerREU - CmerREP - CmerREF - CmerREM  
- CcomCAN - CcomREC - CDesBUR - CDesDIS;

#### SUBJECT TO

LimitAlter[i,j] -> LAlt:

REU[i] + REP[i] + REF[i] + REM[i] + CAN[i,j] + REC[i,j] + BUR[i,j] + DIS[i,j] = 1;

#### BINARY

REU[i];

REP[i];

REF[i];

REM[i];

CAN[i,j];

REC[i,j];

BUR[i,j];

DIS[i,j];

END

### 11.5.2. Anexo. Modelo Matemático de aspectos ambientales en lenguaje MPL.

TITLE

ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb;

OPTIONS

DatabaseType=Access;

DatabaseAcces="RLTMamb.mdb";

INDEX

i := DATABASE ("Products", "IdProduct");

j := DATABASE ("Components", "IdComponent");

DATA

EIT1[i] := DATABASE ("Products", "EIT1");

EIT2[i] := DATABASE ("Products", "EIT2");

EIT3[i] := DATABASE ("Products", "EIT3");

EIT4[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "EIT4");

EIT5[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "EIT5");

EIP1[i] := DATABASE ("Products", "EIP1");

EIP2[i] := DATABASE ("Products", "EIP2");

EIP3[i] := DATABASE ("Products", "EIP3");

EIP4[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "EIP4");

EIR[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "EIR");

EII[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "EII");

EIL[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "EIL");

## PARTE IV. PROPUESTA.

### Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

---

#### VARIABLES

REU[i] EXPORT TO DATABASE ("Products" , "REUSE");  
REP[i] EXPORT TO DATABASE ("Products" , "REPAIR");  
REF[i] EXPORT TO DATABASE ("Products" , "REFURBISH");  
REM[i] EXPORT TO DATABASE ("Products" , "REMANUFACTURE");  
CAN[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp" , "CANNIBALIZATION");  
REC[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp" , "RECYCLE");  
BUR[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp" , "BURNING");  
DIS[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp" , "DISPOSAL");

#### MACROS

EIComun := SUM(i:EIT1[i]);  
EImerREU := SUM(i:EIT2[i] \* REU);  
EImerREP := SUM(i:EIT2[i] \* REP + EIT3 [i]\* REP + EIP1[i]\* REP);  
EImerREF := SUM(i:EIT2[i] \* REF + EIT3 [i]\* REF + EIP2[i]\* REF);  
EImerREM := SUM(i:EIT2[i] \* REM + EIT3 [i]\* REM + EIP3[i]\* REM);  
EIcomCAN := SUM (i,j: EIT4[i,j] \* CAN + EIP4[i,j] \* CAN);  
EIcomREC := SUM (i,j: EIT4[i,j] \* REC + EIR[i,j] \* REC);  
EIdesBUR := SUM (i,j: EIT5[i,j] \* BUR + EII[i,j] \* BUR);  
EIdesDIS := SUM (i,j: EIT5[i,j] \* DIS + EIL[i,j] \* DIS);

#### MODEL

MIN EnvironmentalImpact = EIComun + EImerREU + EImerREP + EImerREF + EImerREM +  
EIcomCAN + EIcomREC + EIdesBUR + EIdesDIS;

#### SUBJECT TO

LimitAlter[i,j] -> LAlt:  
REU[i] + REP[i] + REF[i] + REM[i] + CAN[i,j] + REC[i,j] + BUR[i,j] + DIS[i,j] = 1;

#### BINARY

REU[i];  
REP[i];

REF[i];

REM[i];

CAN[i,j];

REC[i,j];

BUR[i,j];

DIS[i,j];

END

### 11.5.3. Anexo. Modelo Matemático de aspectos sociales en lenguaje MPL.

TITLE

ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamsoc;

OPTIONS

DatabaseType=Access;

DatabaseAcces="RLTMamsoc.mdb";

INDEX

i := DATABASE ("Products", "IdProduct");

j := DATABASE ("Components", "IdComponent");

DATA

SI1[i] := DATABASE ("Products", "SI1");

SI2[i] := DATABASE ("Products", "SI2");

SI3[i] := DATABASE ("Products", "SI3");

SIrep[i] := DATABASE ("Products", "SIrep");

SIref[i] := DATABASE ("Products", "SIref");

SIrem[i] := DATABASE ("Products", "SIrem");

SI4[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SI4");

SI5[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SI5");

SIcon[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SIcon");

SIrec[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SIrec");

## PARTE IV. PROPUESTA.

### Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

---

SIbur[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SIbur");

SIdis[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SIdis");

#### VARIABLES

REU[i] EXPORT TO DATABASE ("Products" , "REUSE");

REP[i] EXPORT TO DATABASE ("Products" , "REPAIR");

REF[i] EXPORT TO DATABASE ("Products" , "REFURBISH");

REM[i] EXPORT TO DATABASE ("Products" , "REMANUFACTURE");

CAN[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp" , "CANNIBALIZATION");

REC[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp" , "RECYCLE");

BUR[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp" , "BURNING");

DIS[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp" , "DISPOSAL");

#### MACROS

SIComun := SUM(i:SI1[i]);

SImerREU := SUM(i:SI2[i] \* REU);

SImerREP := SUM(i:SI2[i] \* REP + SI3 [i]\* REP + SIrep[i]\* REP);

SImerREF := SUM(i:SI2[i] \* REF + SI3 [i]\* REF + SIref[i]\* REF);

SImerREM := SUM(i:SI2[i] \* REM + SI3 [i]\* REM + SIrem[i]\* REM);

SIcomCAN := SUM (i,j: SI4[i,j] \* CAN + SIcan[i,j] \* CAN);

SIcomREC := SUM (i,j: SI4[i,j] \* REC + SIrec[i,j] \* REC);

SIdesBUR := SUM (i,j: SI5[i,j] \* BUR + SIbur[i,j] \* BUR);

SIdesDIS := SUM (i,j: SI5[i,j] \* DIS + SIdis[i,j] \* DIS);

#### MODEL

MAX SocialImpact = SIComun + SImerREU + SImerREP + SImerREF + SImerREM +  
SIcomCAN + SIcomREC + SIdesBUR + SIdesDIS;

#### SUBJECT TO

LimitAlter[i,j] -> LAlt:

REU[i] + REP[i] + REF[i] + REM[i] + CAN[i,j] + REC[i,j] + BUR[i,j] + DIS[i,j] = 1;

#### BINARY

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

```

    REU[i];

    REP[i];

    REF[i];

    REM[i];

    CAN[i,j];

    REC[i,j];

    BUR[i,j];

    DIS[i,j];

    END  LimitAlter[i,j] -> LAlt:

    REU[i] + REP[i] + REF[i] + REM[i] + CAN[i,j] + REC[i,j] + BUR[i,j] + DIS[i,j] = 1;
    
```

BINARY

```

    REU[i];

    REP[i];

    REF[i];

    REM[i];

    CAN[i,j];

    REC[i,j];

    BUR[i,j];

    DIS[i,j];
    
```

END

**11.5.4. Anexo. Generación de todas las posibles soluciones para 4 componentes con 4 alternativas.**

REU	REP	REF	REM	CAN				REC				BUR				DIS			
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0









PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

**11.5.5. Anexo. Valor de DPIP para todas las posibles soluciones con 60%, 30% y 10% de pesos para los valores económicos, ambientales y sociales respectivamente.**

REU	REP	REF	REM	CAN				REC				BUR				DIS				Económico	Ambiental	Social	DPIP	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-31,5	25	1	1,37
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,5	49,5	2	0,93
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,5	52,5	2,5	0,82
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28,5	55,5	5	0,48
0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-32,45	29,55	69,5	1,38
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-36,15	29,25	16	1,50
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-32	43,35	30,5	1,58
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-31,6	62,35	19	1,81
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-40,8	30,55	69	1,57
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-30,15	43,8	83	1,50
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-30,7	50,8	69	1,61
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-44,5	30,25	15,5	1,69
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-40,35	44,35	30	1,77
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-39,95	63,35	18,5	2,00
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-33,85	43,5	29,5	1,62
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-34,4	50,5	15,5	1,73
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	-29,7	57,6	44	1,69
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	-29,3	76,6	32,5	1,93
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	-30,25	64,6	30	1,80
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-29,85	83,6	18,5	2,04
0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-37,25	27,8	74	1,46
0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-29,4	37,05	90,5	1,39
0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-30	40,05	67	1,46
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-40,95	27,5	20,5	1,58
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-36,8	41,6	35	1,65
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-36,4	60,6	23,5	1,89
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-33,1	36,75	37	1,51
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-33,7	39,75	13,5	1,58
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	-28,95	50,85	51,5	1,59
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	-28,55	69,85	40	1,82
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	-29,55	53,85	28	1,66
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	-29,15	72,85	16,5	1,89
0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-45,6	28,8	73,5	1,65

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-34,95	42,05	87,5	1,57	
0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-35,5	49,05	73,5	1,68
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-37,75	38,05	90	1,58
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-38,35	41,05	66,5	1,65
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	-27,1	51,3	104	1,50
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	-27,65	58,3	90	1,61
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	-27,7	54,3	80,5	1,57
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	-28,25	61,3	66,5	1,68
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-49,3	28,5	20	1,77
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-45,15	42,6	34,5	1,84
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-44,75	61,6	23	2,08
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-38,65	41,75	34	1,69
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-39,2	48,75	20	1,80
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	-34,5	55,85	48,5	1,77
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	-34,1	74,85	37	2,00
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	-35,05	62,85	34,5	1,88
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-34,65	81,85	23	2,11
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-41,45	37,75	36,5	1,70
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-42,05	40,75	13	1,77
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	-37,3	51,85	51	1,77
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	-36,9	70,85	39,5	2,01
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	-37,9	54,85	27,5	1,84
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	-37,5	73,85	16	2,08
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	-30,8	51	50,5	1,63
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	-31,35	58	36,5	1,74
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	-31,4	54	27	1,70
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	-31,95	61	13	1,81
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	-26,65	65,1	65	1,70
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	-26,25	84,1	53,5	1,93
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	-27,2	72,1	51	1,81
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	-26,8	91,1	39,5	2,04
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	-27,25	68,1	41,5	1,77
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	-26,85	87,1	30	2,00
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	-27,8	75,1	27,5	1,88
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	-27,4	94,1	16	2,11
0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-33,4	26,55	64,5	1,37
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-33,35	40,05	75	1,52
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-33,25	43,05	69,5	1,56
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-37,1	26,25	11	1,49
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-32,95	40,35	25,5	1,56
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-32,55	59,35	14	1,80
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-37,05	39,75	21,5	1,65
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-36,95	42,75	16	1,69
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-32,9	53,85	36	1,72

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	-32,5	72,85	24,5	1,95
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	-32,8	56,85	30,5	1,76
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	-32,4	75,85	19	1,99	
0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-41,75	27,55	64	1,56	
0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-31,1	40,8	78	1,48	
0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-31,65	47,8	64	1,59	
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	-41,7	41,05	74,5	1,71	
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	-41,6	44,05	69	1,75	
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-31,05	54,3	88,5	1,64	
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	-31,6	61,3	74,5	1,75	
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	-30,95	57,3	83	1,68	
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	-31,5	64,3	69	1,79	
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	-45,45	27,25	10,5	1,68	
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	-41,3	41,35	25	1,75	
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	-40,9	60,35	13,5	1,99	
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	-34,8	40,5	24,5	1,61	
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	-35,35	47,5	10,5	1,72	
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	-30,65	54,6	39	1,68	
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-30,25	73,6	27,5	1,91	
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	-31,2	61,6	25	1,79	
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-30,8	80,6	13,5	2,02	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	-45,4	40,75	21	1,84	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	-45,3	43,75	15,5	1,88	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	-41,25	54,85	35,5	1,91	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	-40,85	73,85	24	2,14	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	-41,15	57,85	30	1,95	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	-40,75	76,85	18,5	2,18	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	-34,75	54	35	1,76	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	-35,3	61	21	1,87	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	-34,65	57	29,5	1,80	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	-35,2	64	15,5	1,91	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	-30,6	68,1	49,5	1,83	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	-30,2	87,1	38	2,07	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	-31,15	75,1	35,5	1,94	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	-30,75	94,1	24	2,18	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	-30,5	71,1	44	1,87	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	-30,1	90,1	32,5	2,11	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	-31,05	78,1	30	1,98	
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-30,65	97,1	18,5	2,22	
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-38,2	24,8	69	1,44	
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-30,35	34,05	85,5	1,38	
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-30,95	37,05	62	1,45	
0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-38,15	38,3	79,5	1,60	
0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-38,05	41,3	74	1,64	

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	-30,3	47,55	96	1,53
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	-30,9	50,55	72,5	1,60
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	-30,2	50,55	90,5	1,57
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	-30,8	53,55	67	1,64
0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-41,9	24,5	15,5	1,57
0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-37,75	38,6	30	1,64
0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-37,35	57,6	18,5	1,87
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-34,05	33,75	32	1,50
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-34,65	36,75	8,5	1,57
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	-29,9	47,85	46,5	1,57
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	-29,5	66,85	35	1,81
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	-30,5	50,85	23	1,64
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	-30,1	69,85	11,5	1,88
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-41,85	38	26	1,72
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	-41,75	41	20,5	1,76
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	-37,7	52,1	40,5	1,79
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	-37,3	71,1	29	2,03
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	-37,6	55,1	35	1,83
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	-37,2	74,1	23,5	2,07
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	-34	47,25	42,5	1,66
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	-34,6	50,25	19	1,73
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	-33,9	50,25	37	1,70
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	-34,5	53,25	13,5	1,77
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	-29,85	61,35	57	1,73
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	-29,45	80,35	45,5	1,96
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	-30,45	64,35	33,5	1,80
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	-30,05	83,35	22	2,03
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	-29,75	64,35	51,5	1,77
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	-29,35	83,35	40	2,00
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	-30,35	67,35	28	1,84
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	-29,95	86,35	16,5	2,07
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-46,55	25,8	68,5	1,63
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-35,9	39,05	82,5	1,56
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-36,45	46,05	68,5	1,67
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-38,7	35,05	85	1,57
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-39,3	38,05	61,5	1,64
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	-28,05	48,3	99	1,49
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	-28,6	55,3	85	1,60
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	-28,65	51,3	75,5	1,56
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	-29,2	58,3	61,5	1,67
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-46,5	39,3	79	1,79
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-46,4	42,3	73,5	1,83
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	-35,85	52,55	93	1,71
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-36,4	59,55	79	1,82

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	-35,75	55,55	87,5	1,75
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	-36,3	62,55	73,5	1,86
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	-38,65	48,55	95,5	1,72
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	-39,25	51,55	72	1,79
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	-38,55	51,55	90	1,76
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	-39,15	54,55	66,5	1,83
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	-28	61,8	109,5	1,65
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	-28,55	68,8	95,5	1,76
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	-28,6	64,8	86	1,72
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	-29,15	71,8	72	1,83
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	-27,9	64,8	104	1,69
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	-28,45	71,8	90	1,80
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	-28,5	67,8	80,5	1,76
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	-29,05	74,8	66,5	1,87
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-50,25	25,5	15	1,76
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-46,1	39,6	29,5	1,83
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-45,7	58,6	18	2,06
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-39,6	38,75	29	1,68
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-40,15	45,75	15	1,79
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	-35,45	52,85	43,5	1,75
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	-35,05	71,85	32	1,99
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	-36	59,85	29,5	1,86
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-35,6	78,85	18	2,10
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-42,4	34,75	31,5	1,69
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	-43	37,75	8	1,76
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	-38,25	48,85	46	1,76
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	-37,85	67,85	34,5	2,00
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	-38,85	51,85	22,5	1,83
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-38,45	70,85	11	2,07
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	-31,75	48	45,5	1,61
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	-32,3	55	31,5	1,72
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	-32,35	51	22	1,69
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	-32,9	58	8	1,80
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	-27,6	62,1	60	1,69
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	-27,2	81,1	48,5	1,92
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	-28,15	69,1	46	1,80
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	-27,75	88,1	34,5	2,03
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	-28,2	65,1	36,5	1,76
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	-27,8	84,1	25	1,99
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	-28,75	72,1	22,5	1,87
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	-28,35	91,1	11	2,10
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	-50,2	39	25,5	1,91
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-50,1	42	20	1,95
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	-46,05	53,1	40	1,98



PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	-45,65	72,1	28,5	<b>2,22</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	-45,95	56,1	34,5	<b>2,02</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	-45,55	75,1	23	<b>2,26</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	-39,55	52,25	39,5	<b>1,84</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	-40,1	59,25	25,5	<b>1,95</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	-39,45	55,25	34	<b>1,88</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	-40	62,25	20	<b>1,99</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	-35,4	66,35	54	<b>1,91</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	-35	85,35	42,5	<b>2,14</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	-35,95	73,35	40	<b>2,02</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	-35,55	92,35	28,5	<b>2,25</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	-35,3	69,35	48,5	<b>1,95</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	-34,9	88,35	37	<b>2,18</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	-35,85	76,35	34,5	<b>2,06</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	-35,45	95,35	23	<b>2,29</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	-42,35	48,25	42	<b>1,84</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	-42,95	51,25	18,5	<b>1,91</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	-42,25	51,25	36,5	<b>1,88</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	-42,85	54,25	13	<b>1,95</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	-38,2	62,35	56,5	<b>1,92</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	-37,8	81,35	45	<b>2,15</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	-38,8	65,35	33	<b>1,99</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	-38,4	84,35	21,5	<b>2,22</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	-38,1	65,35	51	<b>1,96</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	-37,7	84,35	39,5	<b>2,19</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	-38,7	68,35	27,5	<b>2,03</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	-38,3	87,35	16	<b>2,26</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	-31,7	61,5	56	<b>1,77</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	-32,25	68,5	42	<b>1,88</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	-32,3	64,5	32,5	<b>1,84</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	-32,85	71,5	18,5	<b>1,95</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	-31,6	64,5	50,5	<b>1,81</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	-32,15	71,5	36,5	<b>1,92</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	-32,2	67,5	27	<b>1,88</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	-32,75	74,5	13	<b>1,99</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	-27,55	75,6	70,5	<b>1,84</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	-27,15	94,6	59	<b>2,08</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	-28,1	82,6	56,5	<b>1,95</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	-27,7	101,6	45	<b>2,19</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	-28,15	78,6	47	<b>1,91</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	-27,75	97,6	35,5	<b>2,15</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	-28,7	85,6	33	<b>2,02</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	-28,3	104,6	21,5	<b>2,26</b>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	-27,45	78,6	65	<b>1,88</b>

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	-27,05	97,6	53,5	2,12
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	-28	85,6	51	1,99
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	-27,6	104,6	39,5	2,23
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0		-28,05	81,6	41,5	1,95
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1		-27,65	100,6	30	2,19
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0		-28,6	88,6	27,5	2,06
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1		-28,2	107,6	16	2,30

11.5.6. Anexo. Valor de DPIP para todas las posibles soluciones con 20%, 70% y 10% de pesos para los valores económicos, ambientales y sociales respectivamente.

REU	REP	REF	REM	CAN			REC			BUR			DIS			Económico	Ambiental	Social	DPIP				
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,42	0,01	0,10	0,53
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,18	0,71	0,10	0,99
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,13	0,80	0,10	1,02
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0,89	0,10	0,98
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,43	0,14	0,04	0,61
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,45	0,14	0,09	0,67
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,42	0,54	0,07	1,04
0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,42	1,08	0,08	1,59
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,49	0,17	0,04	0,70
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,41	0,55	0,02	0,99
0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,42	0,75	0,04	1,20
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,51	0,16	0,09	0,76
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,48	0,57	0,07	1,12
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,48	1,11	0,08	1,67
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0,44	0,54	0,07	1,05
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0,44	0,74	0,09	1,27
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0,41	0,95	0,06	1,41
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0,41	1,49	0,07	1,96
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0,41	1,15	0,07	1,63
0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,41	1,69	0,08	2,18
0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,09	0,03	0,59
0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,41	0,36	0,02	0,78
0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,41	0,44	0,04	0,89
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,49	0,09	0,08	0,65
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,46	0,49	0,07	1,01
0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,46	1,03	0,08	1,57
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,43	0,35	0,07	0,85
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,44	0,44	0,09	0,96
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0,40	0,75	0,05	1,21
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0,40	1,30	0,06	1,76
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0,41	0,84	0,07	1,32

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0,40	1,38	0,08	1,87
0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,52	0,12	0,03	0,68
0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,45	0,50	0,02	0,97
0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,45	0,70	0,03	1,18
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,46	0,39	0,02	0,87
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,47	0,47	0,04	0,98
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0,39	0,77	0,01	1,16
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0,39	0,97	0,02	1,38
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0,39	0,85	0,03	1,27
0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0,40	1,05	0,04	1,49
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,55	0,11	0,08	0,74
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,52	0,52	0,07	1,10
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,51	1,06	0,08	1,65
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,47	0,49	0,07	1,03
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,48	0,69	0,08	1,25
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0,44	0,90	0,06	1,39
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0,44	1,44	0,07	1,94
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0,45	1,10	0,07	1,61
0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,44	1,64	0,08	2,16
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,49	0,38	0,07	0,94
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,50	0,46	0,09	1,05
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0,46	0,78	0,05	1,30
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0,46	1,32	0,06	1,85
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0,47	0,87	0,07	1,41
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0,46	1,41	0,09	1,96
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0,42	0,76	0,05	1,23
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0,42	0,96	0,07	1,44
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0,42	0,84	0,08	1,34
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0,42	1,04	0,09	1,56
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0,39	1,16	0,04	1,59
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0,38	1,70	0,05	2,14
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0,39	1,36	0,05	1,80
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0,39	1,90	0,06	2,35
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0,39	1,25	0,06	1,70
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0,39	1,79	0,07	2,25
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0,40	1,45	0,07	1,92
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0,39	1,99	0,09	2,47
0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,43	0,06	0,04	0,53
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,43	0,44	0,03	0,91
0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,43	0,53	0,04	1,00
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,46	0,05	0,09	0,60
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,43	0,45	0,08	0,96
0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,43	1,00	0,09	1,51
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,46	0,44	0,08	0,98
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,46	0,52	0,09	1,07
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,43	0,84	0,07	1,34

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0,43	1,38	0,08	1,89
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0,43	0,92	0,07	1,43
0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0,43	1,47	0,08	1,98
0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,49	0,09	0,04	0,62
0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,42	0,47	0,03	0,91
0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,42	0,67	0,04	1,13
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,49	0,47	0,03	1,00
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,49	0,56	0,04	1,09
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0,42	0,85	0,02	1,29
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0,42	1,05	0,03	1,51
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0,42	0,94	0,02	1,38
0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0,42	1,14	0,04	1,60
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,52	0,08	0,09	0,69
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,49	0,48	0,08	1,05
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,49	1,02	0,09	1,60
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0,44	0,46	0,08	0,98
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0,45	0,66	0,09	1,20
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0,42	0,86	0,06	1,34
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0,41	1,40	0,07	1,89
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0,42	1,06	0,08	1,56
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,42	1,60	0,09	2,11
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0,52	0,46	0,08	1,06
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0,52	0,55	0,09	1,15
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0,49	0,87	0,07	1,42
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0,49	1,41	0,08	1,97
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0,49	0,95	0,07	1,51
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0,49	1,50	0,08	2,06
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0,44	0,84	0,07	1,35
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0,45	1,04	0,08	1,57
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0,44	0,93	0,07	1,44
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0,45	1,13	0,09	1,66
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0,41	1,25	0,05	1,72
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0,41	1,79	0,07	2,27
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0,42	1,45	0,07	1,93
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0,42	1,99	0,08	2,48
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0,41	1,33	0,06	1,81
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0,41	1,87	0,07	2,36
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0,42	1,53	0,07	2,02
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0,42	2,07	0,08	2,57
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,47	0,01	0,04	0,51
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,41	0,27	0,02	0,71
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,42	0,36	0,04	0,82
0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,47	0,39	0,03	0,89
0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,47	0,48	0,03	0,98
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,41	0,66	0,01	1,08
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0,42	0,74	0,03	1,19

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0,41	0,74	0,02	1,17
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0,42	0,83	0,04	1,28
0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,49	-	0,09	0,58
0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,46	0,40	0,07	0,94
0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,46	0,95	0,08	1,49
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0,44	0,26	0,07	0,77
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0,44	0,35	0,09	0,89
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0,41	0,67	0,06	1,13
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0,41	1,21	0,07	1,69
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0,41	0,75	0,08	1,25
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0,41	1,30	0,09	1,80
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,49	0,39	0,08	0,96
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,49	0,47	0,08	1,05
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0,46	0,79	0,06	1,32
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0,46	1,33	0,07	1,87
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0,46	0,87	0,07	1,41
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0,46	1,42	0,08	1,96
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0,44	0,65	0,06	1,15
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0,44	0,74	0,08	1,26
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0,44	0,74	0,07	1,24
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0,44	0,82	0,09	1,35
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0,41	1,05	0,05	1,51
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0,41	1,60	0,06	2,06
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0,41	1,14	0,07	1,62
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0,41	1,68	0,08	2,17
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0,41	1,14	0,05	1,60
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0,41	1,68	0,06	2,15
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0,41	1,22	0,07	1,71
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0,41	1,77	0,08	2,26
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,53	0,04	0,04	0,60
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0,45	0,42	0,02	0,89
0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,46	0,62	0,04	1,11
0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,47	0,30	0,02	0,80
0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,48	0,39	0,04	0,91
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0,40	0,68	0,01	1,09
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0,40	0,88	0,02	1,30
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0,40	0,77	0,03	1,20
0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0,40	0,97	0,04	1,41
0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,53	0,42	0,03	0,98
0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,53	0,51	0,03	1,07
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0,45	0,80	0,02	1,27
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0,46	1,00	0,03	1,48
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0,45	0,89	0,02	1,36
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0,45	1,09	0,03	1,57
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,47	0,69	0,01	1,17
0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,48	0,77	0,03	1,28

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0,47	0,77	0,02	1,26	
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0,47	0,86	0,04	1,37	
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0,40	1,07	-	1,46	
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0,40	1,27	0,01	1,68
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0,40	1,15	0,02	1,57
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0,40	1,35	0,03	1,79
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0,40	1,15	0,01	1,55
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0,40	1,35	0,02	1,77
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0,40	1,24	0,03	1,66
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0,40	1,44	0,04	1,88
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,55	0,03	0,09	0,67
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,52	0,43	0,07	1,03
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,52	0,97	0,08	1,58
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,48	0,41	0,07	0,96
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0,48	0,61	0,09	1,18
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0,45	0,81	0,06	1,32
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0,45	1,35	0,07	1,87
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0,45	1,01	0,07	1,54
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0,45	1,55	0,08	2,09
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,50	0,29	0,07	0,86
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,50	0,38	0,09	0,97
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0,47	0,70	0,06	1,22
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0,47	1,24	0,07	1,77
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0,47	0,78	0,08	1,33
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0,47	1,32	0,09	1,88
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0,42	0,67	0,06	1,15
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0,43	0,87	0,07	1,37
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0,43	0,76	0,08	1,26
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0,43	0,96	0,09	1,48
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0,39	1,07	0,05	1,51
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0,39	1,62	0,06	2,06
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0,40	1,27	0,06	1,73
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0,39	1,82	0,07	2,28
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0,40	1,16	0,07	1,62
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0,40	1,70	0,08	2,18
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0,40	1,36	0,08	1,84
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0,40	1,90	0,09	2,39
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,55	0,41	0,08	1,04
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0,55	0,50	0,08	1,13
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0,52	0,82	0,06	1,40
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0,52	1,36	0,07	1,95
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0,52	0,90	0,07	1,49
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0,52	1,45	0,08	2,04
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0,48	0,79	0,06	1,33
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0,48	0,99	0,08	1,55
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0,48	0,88	0,07	1,42

PARTE IV. PROPUESTA.

Capítulo 11. Bloque II – Herramienta Matemática Genérica: Validación mediante experimentación

0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0,48	1,08	0,08	1,64	
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0,45	1,20	0,05	1,69	
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0,45	1,74	0,06	2,25	
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0,45	1,40	0,06	1,91	
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0,45	1,94	0,07	2,46
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0,45	1,28	0,06	1,78	
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0,44	1,82	0,07	2,34	
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0,45	1,48	0,07	2,00	
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0,45	2,02	0,08	2,55	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0,50	0,68	0,06	1,24	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0,50	0,76	0,08	1,35	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0,50	0,76	0,07	1,33	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0,50	0,85	0,09	1,44	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0,47	1,08	0,05	1,60	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0,47	1,62	0,06	2,15	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0,47	1,17	0,07	1,71	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0,47	1,71	0,08	2,26	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0,47	1,17	0,05	1,69	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0,46	1,71	0,06	2,24	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0,47	1,25	0,07	1,80	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0,47	1,80	0,09	2,35	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0,42	1,06	0,05	1,53	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0,43	1,26	0,06	1,75	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0,43	1,14	0,07	1,64	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0,43	1,34	0,08	1,86	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0,42	1,14	0,05	1,62	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0,43	1,34	0,07	1,84	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0,43	1,23	0,08	1,73	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0,43	1,43	0,09	1,95	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0,39	1,46	0,04	1,89	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0,39	2,00	0,05	2,44	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0,40	1,66	0,05	2,11	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0,39	2,20	0,06	2,66	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0,40	1,55	0,06	2,00	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0,39	2,09	0,07	2,55	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0,40	1,75	0,07	2,22	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0,40	2,29	0,08	2,77	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0,39	1,55	0,04	1,98	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0,39	2,09	0,05	2,53	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0,40	1,75	0,05	2,20	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0,39	2,29	0,06	2,75	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0,40	1,63	0,06	2,09	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0,39	2,17	0,07	2,64	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0,40	1,83	0,07	2,31	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0,40	2,37	0,09	2,86	

## **Capítulo 12. Bloque III - Modelo genérico integrado.**



## 12.1. Introducción

Los objetivos inicialmente previstos para ser abordados con la presente tesis se agruparon en tres grupos: formalización del PLI, mejorar la agilidad y la eficiencia en la toma de decisión sobre la disposición, y la consideración de la sostenibilidad en la toma de decisiones.

Tal y como ya se explicó en el capítulo 6, el primer grupo de objetivos se ha abordado mediante el modelado de procesos de negocio (capítulo 8), mientras que el segundo y el tercer grupo se han afrontado mediante el diseño de una herramienta matemática, basada en el modelado matemático y en un proceso de solución multi-objetivo (capítulos 9, 10 y 11). En este capítulo, se va a plantear la combinación de ambos tipos de modelado (de procesos y matemático) para cumplir todos los objetivos, mediante una solución integrada. Para ello, se va a proponer un modelo genérico del PLI que, como novedad respecto al Bloque I del Marco de Referencia, incorpora el proceso de solución de la herramienta matemática del Bloque II en forma de subproceso en el PLI genérico. En la figura siguiente (Figura 207) se destaca mediante un rectángulo rojo el ámbito de actuación del capítulo con respecto al Marco de Referencia propuesto.

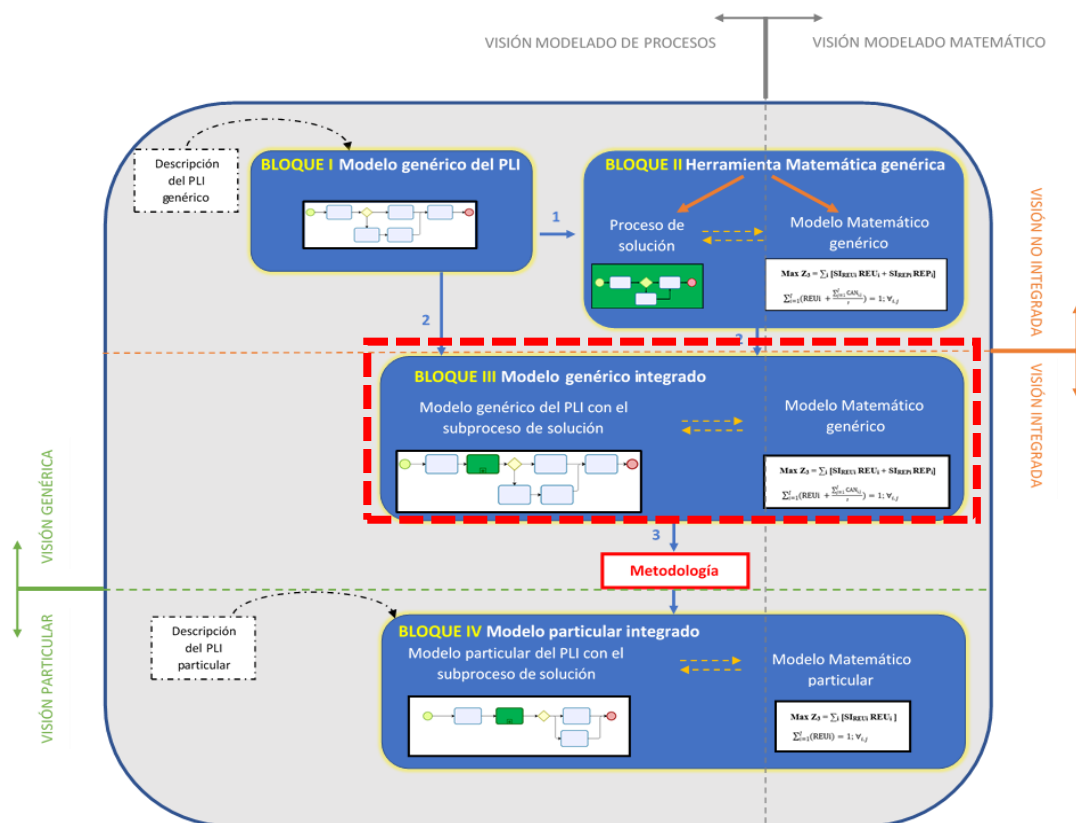


Figura 207. Ámbito de trabajo del capítulo sobre el Marco de Referencia propuesto (Elaboración Propia)

Esta integración del proceso de solución en el PLI genérico es una de las claves del Marco de Referencia y, por lo tanto, de la tesis, en cuanto que plantea por primera vez la fusión o integración del modelado de procesos con el modelado matemático y, en concreto, con el proceso que hay que seguir para utilizar dicho modelo matemático y encontrar soluciones.

La integración del PLI y el proceso de solución permitirá que se aborden todos los objetivos de la tesis de manera conjunta. Además, facilita la adaptación del Marco de Referencia a cada caso particular, representado en el Bloque IV y expuesto en el capítulo siguiente.

A continuación, se expone el modelo genérico del PLI con la inclusión del subproceso de solución de la herramienta matemática como solución integral al problema planteado.

## 12.2. Modelo genérico del PLI con el subproceso de solución

En este tercer Bloque, tomando como base el modelo genérico del PLI, propuesto en el Capítulo 8, se procederá a integrar la herramienta matemática de ayuda a la toma de decisiones en aquellos puntos del PLI en los que se toma la DD.

Tal y como se puede apreciar en la Figura 23 (Bloque I con ubicación de decisiones clave), la DD es tomada a lo largo del PLI, principalmente, en tres ocasiones diferentes: en el primer momento que **el cliente se pone en contacto con la empresa** y esta debe decidir si trata la devolución o recuperación del producto; en el momento en que **el producto llega a las instalaciones de la empresa** y se inspecciona por parte del personal de la empresa y, por último, en el momento en el que **se decide desmontar el producto para aprovechar los componentes** y qué hacer con cada uno de estos.

A continuación, se explican estos tres momentos clave y la forma en que se utilizará la herramienta:

1. **El cliente contacta con la empresa.** En el preciso instante que el cliente contacta con la empresa, bien sea presencialmente, por teléfono o por email, se tendrá que decidir si la empresa trata la devolución o recuperación del producto. Generalmente, en ese momento no se toma la decisión final, pues tampoco el cliente suele ser atendido por el decisor que tiene la última palabra con respecto al producto, pero sí se debe disponer de suficiente información como para decidir si continuar el PLI o dejarlo en este punto. Para tomar dicha decisión, el primer

decisor debe recopilar información fundamental para cada caso, tanto por parte del cliente como por parte de la empresa, tal y como se detalla a continuación:

**a. Información a conseguir por parte del cliente:**

- i. Estado actual del producto. Resultará esencial por parte de la empresa obtener la mayor y mejor información posible del estado actual del producto, con la intención de poder ir catalogándolo para una posible disposición. En este caso, la empresa puede catalogar el producto, ayudado a través de la información que le pueda facilitar el cliente, de cuatro formas: producto en perfecto estado, producto con fallo leve o superficial, producto con fallo grave y estado no concreto.
- ii. Fecha de compra. Será imprescindible la comprobación de la fecha de adquisición o compra para corroborar el periodo de garantía correspondiente y tener claro quién debe asumir los posibles costes de tratamiento o el pago por la recuperación.
- iii. Coste de adquisición del producto. Otro dato esencial es el precio de adquisición del producto en su momento. Este dato puede ser esencial también para determinar la disposición del producto puesto que puede darse el caso que, ante un producto de muy bajo precio, a la empresa no le compense económicamente recogerlo para tratarlo y decida regalárselo al cliente, bien devolviéndole el importe abonado o bien regalándole un nuevo producto.
- iv. Lugar en el que se encuentra. El lugar donde se encuentre el producto y la consecuente rentabilidad económica, impacto ambiental y social correspondiente de recuperar el producto, también resulta importante para la primera decisión sobre la aceptación del producto para tratarlo.

**b. Información a conseguir por parte de la empresa:**

- i. Confirmación de datos del producto. A parte de comprobar la certeza de los datos aportados por el cliente, resultará imprescindible por parte de la empresa, recabar la máxima

información sobre el producto en cuestión. Pensando en la posible recuperación y tratamiento, debería confirmar las dimensiones del producto.

- ii. Opciones de transporte entre cliente y empresa. Basándose en la información sobre el lugar en el que se encuentra el producto, la empresa debe tener en cuenta las diferentes opciones de transporte entre empresa y cliente para valorar las opciones de recuperación.
- iii. Demanda actual del producto/componentes. Otra información determinante que la empresa debe recabar sobre cada producto es la demanda actual sobre cada producto y/o sus posibles componentes, pensando ya en las posibles opciones de disposición disponibles en ese momento.
- iv. Legislación referente al producto y sus componentes. Otra información imprescindible a tener en cuenta ante posibles opciones de recuperación y tratamiento es la legislación referente a los productos o componentes. Dichos datos serán determinantes a la hora de evitar posibles sanciones o poder conseguir algún tipo de subvención o abonos por recuperación y/o tratamiento.

- 2. El producto llega a las instalaciones de la empresa.** En el momento en que el producto es recibido por parte de la empresa, aunque ya se haya podido realizar un diagnóstico previo, generalmente hace falta realizarle una inspección para decidir la opción de disposición preferible en cada caso. Para tomar dicha decisión, hará falta concretar todos los datos aportados anteriormente sobre el producto y sobre el resto de los aspectos relacionados (legislación, demanda, costes de transporte y recuperación). Partiendo de toda la información obtenida previamente, el decisor determinará si hay alguna novedad significativa que justifique la utilización de la herramienta para corroborar la alternativa seleccionada o no. En caso de que haya novedades sobre el producto respecto al primer uso de la herramienta, se utilizará de nuevo la herramienta para decidir: a) si es más conveniente volver a sacar el producto al mercado, tal y como está, b) si hace falta intervenir sobre él para sacarlo de nuevo al mercado o c) si es más

interesante desmontarlo para aprovechar sus componentes. Cada una de estas tres opciones se explican a continuación con mayor detalle:

- a. Reuso/reventa directa del producto.** En el momento que se determina que el producto se puede volver a introducir en el mercado, la empresa debe decidir si lo pone a la venta por el canal tradicional de venta o bien si lo pone de nuevo en el mercado por un canal secundario tipo outlet a un precio más reducido o incluso donarlo.
  - b. Intervención sobre el producto.** En aquellos casos en que se determine que el producto necesita de una intervención para volver a salir de nuevo al mercado, posiblemente habrá que desplazar de nuevo el producto hasta el lugar de la intervención. Una vez allí, se realizará la intervención que precise el producto según el grado de intervención que resulte más adecuado (reparación, reacondicionamiento o remanufactura). En el momento en el que se acabe dicha intervención, la empresa puede llegar a plantearse si el producto precisa de un nuevo tratamiento (para lo cual podría utilizar de nuevo la herramienta) o bien si el producto tiene el estado adecuado para salir de nuevo al mercado.
  - c. Aprovechamiento de componentes.** Si la opción de disposición planteada está basada en el aprovechamiento de los componentes, la primera operación que se deberá realizar será el desmontaje del producto para la obtención de los componentes. A partir de ese momento, se podrá utilizar de nuevo la herramienta para determinar la disposición definitiva de cada componente según el estado concreto de cada uno de ellos. Esta opción se explica con mayor detalle a continuación.
3. **El producto se desmonta en componentes.** Cuando se decide que la opción de disposición más adecuada se basa en el aprovechamiento de los componentes, se puede utilizar la herramienta para concretar la opción de disposición más conveniente para cada uno de los componentes, si es que, tras concretar el estado del componente, se observa que existe alguna novedad sobre el estado del mismo que lo justifique. En estos casos, la herramienta puede servir de ayuda para decidir si el componente es destinado bien a la canibalización, bien al reciclaje o bien como residuo a través de la incineración o vertido.

En el momento de la toma de decisión sobre la disposición de los productos de LI, los decisores deben manejar ampliamente su conocimiento sobre todo el PLI y sobre toda la información que determina la DD. La gran aportación de esta tesis se centra en integrar toda esta información, aportada desde dos modelos diferentes que habitualmente se utilizan de manera aislada y desconectada. De esta forma, se ha conseguido evolucionar el modelo del PLI propuesto inicialmente hacia un modelo mucho más completo e integrado.

En la figura siguiente (Figura 208) se muestra el PLI genérico incorporando el proceso de solución de la herramienta matemática, lo cual permite al usuario entender cuándo tiene que utilizarse esta. Dicha herramienta es representada en una caja de acción mediante un subproceso (subproceso de solución). En la figura se pueden observar las tres ocasiones comentadas anteriormente en las que se puede utilizar la herramienta, consiguiendo así evolucionar y mejorar el PLI.

Cabe recordar que se trata de un proceso genérico, por tanto, intenta recoger toda la casuística posible que puede existir alrededor del PLI.

En el capítulo siguiente, se muestra cómo se va a proceder para adaptar este proceso genérico integrado (proceso de PLI y subproceso de solución) a cada caso particular.

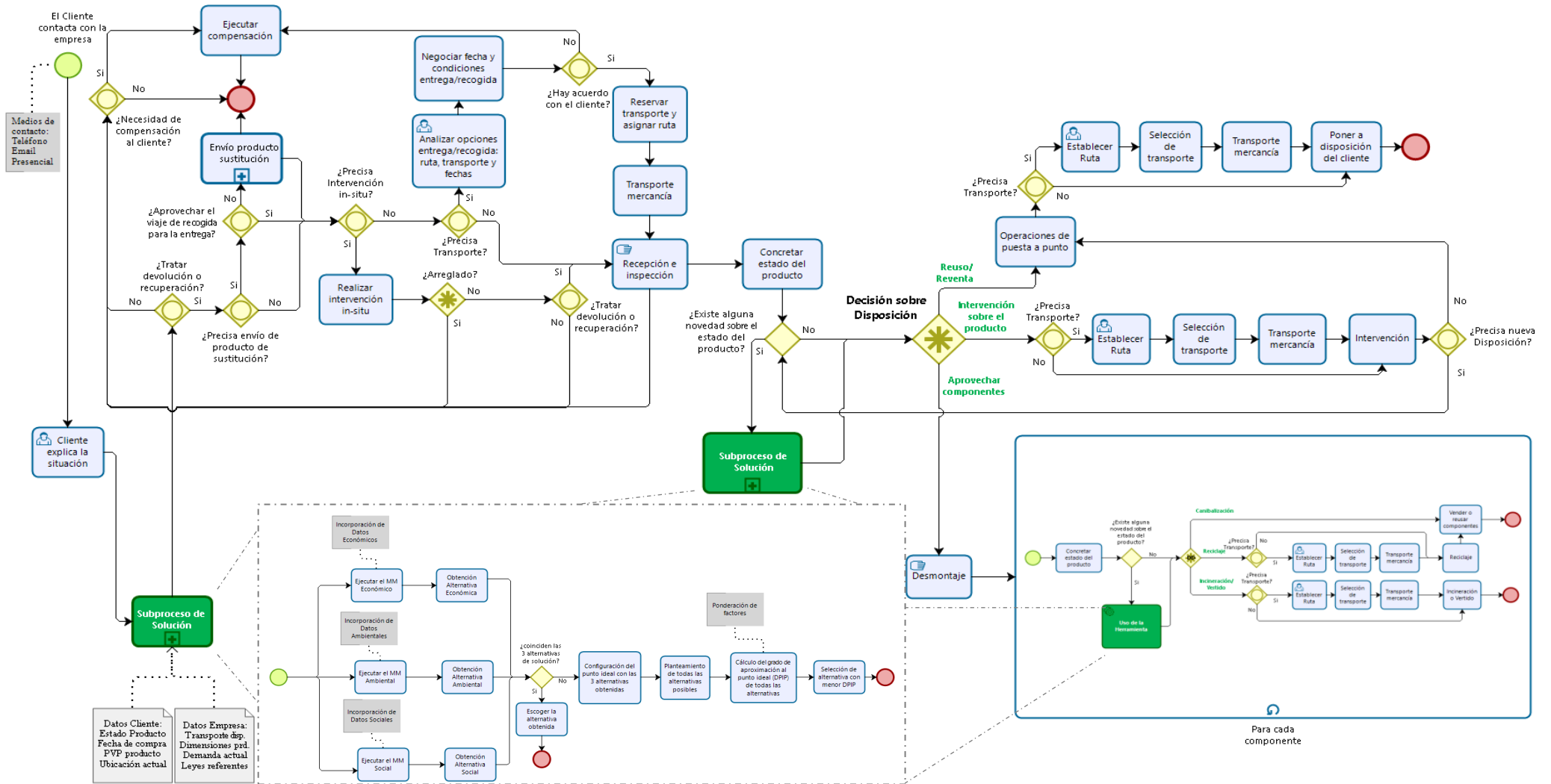


Figura 208. Propuesta de PLI genérico con la incorporación del Subproceso de Solución (Elaboración Propia)

**Capítulo 13. Metodología de adaptación y  
Bloque IV - Modelo particular integrado.**



### 13.1. Introducción

En el presente capítulo se trata la posibilidad de adaptación del modelo genérico integrado del Bloque anterior a cada caso concreto, como una aportación esencial para facilitar su uso y mejorar el desarrollo del PLI. Para ayudar al usuario en este proceso de adaptación, del modelo genérico integrado a un modelo particular integrado o concreto, se ha desarrollado una **metodología** de trabajo adicional que se utilizaría como nexo entre los Bloques III y IV, constituyendo así un elemento clave dentro del Marco de Referencia.

En la figura siguiente (Figura 209) se destaca mediante un rectángulo rojo, la parte del Marco de Referencia que representa, tanto la metodología que conecta los Bloques III y IV, como el Bloque IV.

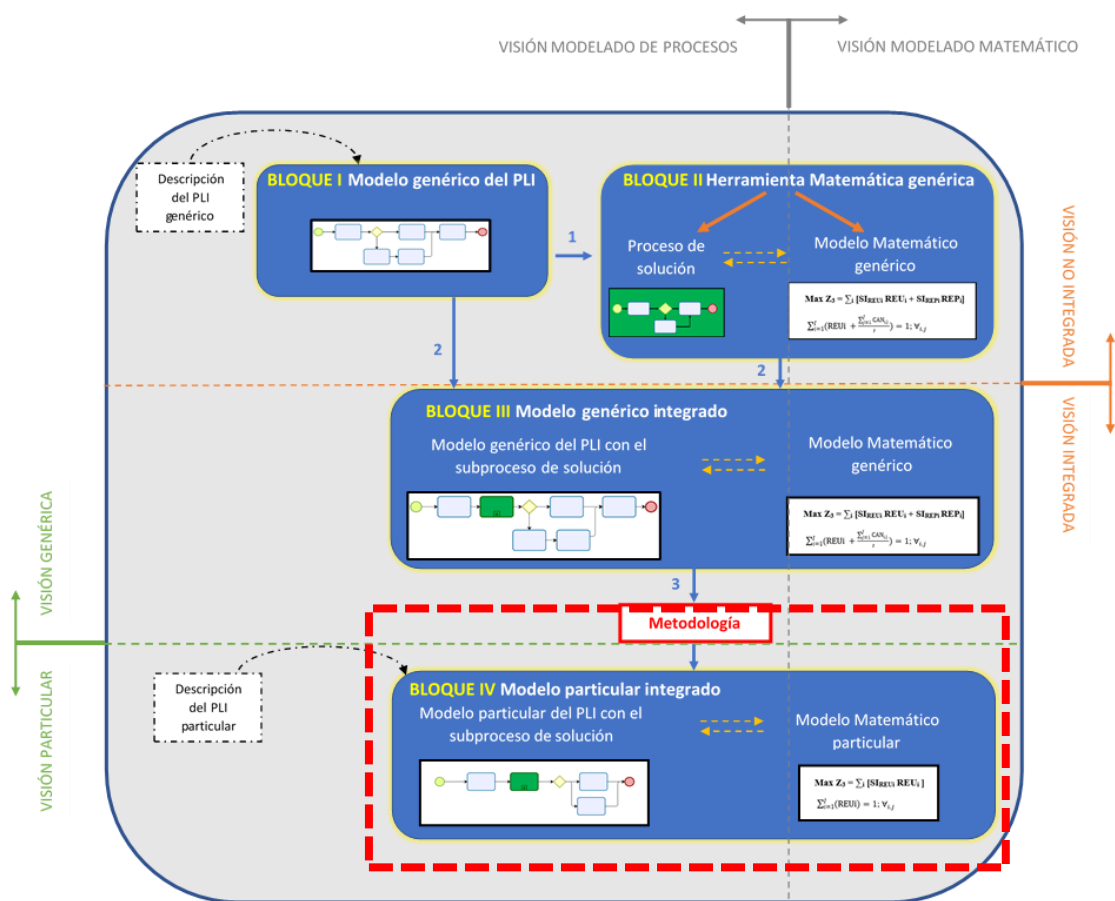


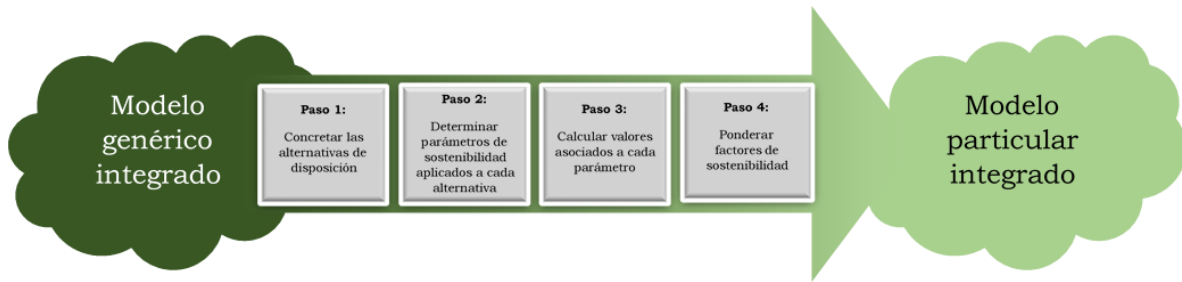
Figura 209. Ámbito de trabajo del capítulo sobre el Marco de Referencia propuesto (Elaboración Propia)

En la sección 13.2 se muestran los pasos de la metodología para realizar la adaptación del modelo genérico integrado a casos concretos.

### 13.2. Metodología de adaptación del modelo genérico integrado a casos concretos

En este apartado, se describen los pasos de la metodología para adaptar el modelo genérico integrado (PLI y modelo matemático genéricos), a modelos particulares.

A continuación, se incluye un esquema de la metodología para facilitar el seguimiento y entendimiento de la posterior explicación de sus pasos:



**Figura 210.** Esquema de la Metodología de adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado (Elaboración Propia)

#### Paso 1. Concretar las alternativas de disposición.

En el modelo genérico integrado han sido contempladas todas las posibles alternativas de disposición para poder dar cabida a todos los modelos posibles de PLI posible. Por ello, el primer paso para adaptar el modelo genérico será concretar las alternativas que son factibles o viables en el caso concreto para el que se está adaptando el PLI genérico integrado, eliminando o modificando las alternativas de decisión según proceda. Para facilitar este paso, se propone el uso de una tabla (Tabla 20) donde se muestran las ocho alternativas de disposición:

Alternativas de disposición	
	1.- Reutilización
	2.- Reparación
	3.- Reacondicionamiento
	4.- Remanufacturación

	5.- Canibalización
	6.- Reciclaje
	7.- Incineración
	8.- Vertido

**Tabla 20.** Posibles alternativas de disposición para seleccionar si se aplican al modelo particular o no. (Elaboración propia).

En esta tabla se marcarán las alternativas que sean aplicables al modelo particular y las que no a través de la simbología siguiente:

 *Alternativa que se aplica*

 *Alternativa que no se aplica*

Además, la concreción de las alternativas de disposición viables también se trasladará a la herramienta matemática, mediante la modificación de las variables del modelo matemático, eliminando toda la información referente a las alternativas de disposición que no deban ser consideradas.

En este sentido, por ejemplo, si la alternativa de reutilización o reuso no está contemplada o no es viable, como en el caso de los residuos abocados en los contenedores de reciclaje, dicha alternativa desaparecería del modelo del proceso. Asimismo, también desaparecería la alternativa de reutilización en el modelo matemático como variable de decisión. Lo que equivaldría a igualarla a 0 para que no pudiese ser seleccionada.

**Paso 2. Determinar parámetros de sostenibilidad aplicados a cada alternativa.**

Concretadas las alternativas disponibles, se determinarán los parámetros que son aplicables a cada una de las posibles alternativas de disposición, revisando todos los parámetros definidos y eliminando aquellos que no sean de aplicación para el caso concreto. Para ello, se utilizará una tabla donde se muestren todos los parámetros aplicables (sombreados en azul los que hacen referencia a las alternativas de producto, en verde los que hacen referencia a las alternativas de componentes y en marrón los que hacen referencia a todas las alternativas) y se marcarán (utilizando las mismas marcas que en las alternativas) aquellos parámetros que se apliquen y los que no se apliquen.

A continuación, se muestra una tabla (Tabla 21) de ejemplo con un parámetro ambiental común a todas las alternativas (color marrón) que se aplica al caso particular (check verde) y un parámetro ambiental específico de una alternativa de producto (color azul) que no se aplica al caso particular (check rojo).

<b>Parámetros ambientales comunes a todas las alternativas:</b>		
✔	<b>EIT<sub>ii</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa
<b>Parámetros ambientales específicos a cada alternativa de disposición:</b>		
✘	<b>EIP<sub>ii</sub></b>	impacto ambiental de reparación del producto i

**Tabla 21.** Ejemplo de tabla de parámetros ambientales con la selección de parámetros aplicables al caso particular (Elaboración propia).

Dicha información puede afectar al modelo del PLI cuando se eliminen determinados pasos que no son viables. Por ejemplo, en el caso de las compras de ropa en tienda, son los clientes los que acuden a la tienda a devolver su producto y, por tanto, desaparece todo lo relacionado con el transporte de recogida de productos en casa del cliente. Asimismo, todos aquellos parámetros que no resulten aplicables al caso concreto serían eliminados del modelo matemático para que quede adaptado.

Tanto la concreción de las alternativas de disposición aplicables al caso particular como la determinación de los parámetros de sostenibilidad referentes a dichas alternativas influirán en la adaptación del modelo genérico del PLI al caso particular. Por ello, en este punto de la metodología, se especificarán los principales cambios en la adaptación del modelo genérico del PLI al modelo particular, de la siguiente manera:

- En primer lugar, se le asignará un número a cada cambio sustancial en el proceso.
- En segundo lugar, se marcará con un recuadro rojo la zona del cambio a realizar sobre el modelo del PLI genérico integrado.
- En tercer lugar, se adaptará el modelo del PLI en base a los cambios indicados, dejando el recuadro rojo en la misma zona para destacar las modificaciones realizadas.

Del mismo modo que la concreción de las alternativas y la determinación de los parámetros afecta al modelo del PLI, también lo hará sobre el Modelo Matemático genérico, permitiendo su adaptación en cuanto a variables de decisión, función objetivo y restricciones se refiere.

### **Paso 3. Calcular valores de sostenibilidad asociados a cada parámetro.**

En cada caso particular, y para cada producto en concreto, se deben calcular los valores correspondientes a los parámetros de sostenibilidad, referentes a cada una de las alternativas de disposición. A continuación, se indica cómo calcular los valores de sostenibilidad asociados a cada parámetro:

- a. Valores económicos:** Los valores económicos correspondientes a las distintas alternativas, hacen referencia a los ingresos y costes asociados a las actividades necesarias para ejecutar las alternativas de disposición, tal y como se ha explicado en capítulos anteriores. La empresa, determinará mediante tasación, investigación o aproximación los valores económicos correspondientes.
- b. Valores ambientales:** Según las condiciones de cada caso concreto, se podrá investigar el valor ambiental referente a cada

acción que suponga la alternativa de disposición. En este sentido, se necesitarán obtener valores de transporte (distancia, tipo de transporte, nivel de carga, ...) operación (energía consumida, dimensiones del producto, tiempo de trabajo, ...) y desecho (tipo de eliminación, peso, dimensiones, ...). Para ello, se introducen directamente los valores de cada situación a través del software *OpenLCA*, el cual aportará el valor de impacto ambiental referente a cada acción.

- c. **Valores sociales.** Los valores referentes al impacto social de cada alternativa se obtienen gracias a la medición de horas de mano de obra necesarias para ejecutar cada disposición y el valor de la tasa de desempleo de la zona donde se realiza la acción.

Al final de cada Apartado se calcularán los valores, bien de rentabilidad económica, impacto ambiental o impacto social, correspondientes a cada alternativa de disposición aplicable al caso particular. Además, se mostrará una tabla resumen (Tabla 22) con los resultados obtenidos de cada una de las alternativas para cada tipo de valores.

A continuación, se muestra un ejemplo de tabla con los valores de rentabilidad económica de dos alternativas diferentes, una aplicable al producto (reacondicionamiento) y otra aplicable al componente (canibalización). Cabe recordar que, como solución, se debe seleccionar o bien una alternativa correspondientes al producto o bien una alternativa correspondiente a cada componente.

Valores de rentabilidad económica correspondiente a cada alternativa:		
<b>EP<sub>REFi</sub></b>	-103'30 €/ud	rentabilidad económica debido al reacondicionamiento del producto i
<b>EP<sub>CANIi</sub></b>	-94'273 €/ud	rentabilidad económica debido a la canibalización del componente 1 estructura del producto i

**Tabla 22.** Ejemplo de Valores de rentabilidad económica correspondientes a cada alternativa  
(Elaboración propia).

#### **Paso 4. Ponderar factores de sostenibilidad.**

Se deja a elección del decisor para que, en cada caso concreto, establezca el peso de los factores componentes de la sostenibilidad. De esta forma, en cada caso, se puede establecer un valor de ponderación para la rentabilidad económica, el impacto ambiental y el impacto social de las alternativas disponibles.

Asimismo, se pueden establecer escenarios con repartos distintos en la ponderación de factores que permitan analizar las soluciones desde diferentes puntos de vista.

**En el momento en el que se realizan estos cuatro pasos, adaptando los modelos genéricos del PLI y el matemático, con la determinación de las alternativas disponibles, el establecimiento de los parámetros de aplicación, sus valores y la ponderación de los factores de sostenibilidad, el Modelo genérico integrado queda adaptado al caso concreto, obteniendo así el Modelo particular integrado.**

De esta forma, queda realizado el paso 3 del Marco de Referencia propuesto (Figura 209) y se obtiene el **BLOQUE IV**. A partir de este punto, ya se podría ejecutar el subproceso de solución para obtener la alternativa de disposición más adecuada en el caso particular.

En los siguientes apartados, se muestra la aplicación del Marco de Referencia a dos ejemplos de aplicación. En ellos, se puede comprobar el proceso de adaptación del modelo genérico integrado (Bloque III) a cada caso concreto. En primer lugar (Capítulo 14), se aplica el MR-DIMPM-LI en una empresa fabricante de sillones de relax, que componen una red de LI de bucle cerrado, donde los sillones devueltos o recuperados entran de nuevo en el sistema de fabricación original.

En segundo lugar (Capítulo 15), se aplica el MR-DIMPM-LI en una empresa de tratamiento de neumáticos usados, que componen una red de LI de bucle abierto, donde los neumáticos son tratados por empresas, independientes de sus fabricantes originales, que solamente tratan productos recuperados.

## **PARTE V. APLICACIÓN**



## **Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax**

## 14.1. Introducción

La industria europea del mueble se enfrenta, actualmente, a una variedad de **desafíos** económicos, legislativos y ambientales, como son: el crecimiento en la fabricación y mejoras logísticas de los países emergentes, la disminución de los aranceles al comercio exterior, el aumento de la demanda de artículos de bajo coste y el aumento de costes de materias primas, mano de obra y energía en Europa (Erasmus + Programme of the European union, 2018).

Dentro de los estados miembros de la UE se desechan, cada año, cerca de 10 millones de toneladas de muebles. A pesar de que las tasas de reaprovechamiento de productos han mejorado en la UE a raíz de la introducción de nuevas políticas verdes, entre el 80% y el 90% de los residuos de muebles en la UE se destinan a **vertederos o a incineración**, según las estadísticas de la European Federation of Furniture Manufacturers (EFFM). Asimismo, existe una actividad mínima en los flujos circulares, con una tasa de **reciclaje** próxima al 10 % y una **refabricación** menor del 2% (Forrest *et al.*, 2017).

La actividad de **reutilización** en el sector también es baja, llevándose a cabo principalmente en tiendas de segunda mano o en organizaciones benéficas con objetivos sociales. En el Reino Unido, a través de los Datos de la Furniture Reuse Network (FRN), se recogen anualmente 120.000 toneladas de muebles para reutilización, representando aproximadamente un 6% del total de muebles destinados como residuos.

En esta misma línea, España es el primer país europeo que establece un objetivo obligatorio de reutilización nacional, marcando como objetivo que el 50% de los residuos, de todo tipo, sean reciclados o preparados para su reutilización, a través del Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR 2016-22). Dentro de este objetivo, se especifica que un 2% mínimo de los residuos se prepararán para la reutilización, señalando los muebles como un residuo claramente susceptible de ser revendido.

En este sentido, **las barreras** (y al mismo tiempo desafíos) que se encuentra el sector del mueble en la **implantación de un flujo circular** se basan en la deficiente calidad y diseños de los materiales, la falta de información y estandarización de alternativas de disposición, la deficiente información para el consumidor, la baja disponibilidad de repuestos, la inadecuada infraestructura de LI, los elevados costes de reparación y

reacondicionamiento y la débil demanda de productos de segunda mano y de materiales reciclados, entre otras (Forrest *et al.*, 2017).

Los desafíos de sostenibilidad a menudo se abordan desde un punto de vista técnico y unidimensional (generalmente económica). En cambio, utilizar herramientas bajo un enfoque sistémico que permita observar estos problemas de manera integral y multidimensional, puede facilitar la transformación de las empresas hacia una economía circular.

En el caso concreto de los **sillones de relax**, la recuperación, clasificación y posterior disposición de los productos devueltos o recuperados, componen una CdS de lazo cerrado, donde la misma empresa fabricante del producto, se encarga de la recogida, inspección y posterior disposición.

El tipo de producto a trabajar, en este caso, es de compleja recuperación ya que está compuesto de cuatro componentes básicos de muy distinta naturaleza y grado de peligrosidad: madera, telas/cueros/plásticos, metales y componentes eléctricos/electrónicos.

Evidentemente, este hecho, hace más compleja la tarea de recuperación que la de un mueble fabricado exclusivamente con madera.

El producto en cuestión sería como el que se presenta en la imagen siguiente:



**Figura 211.** Tipo de producto tratado en el ejemplo de aplicación (Elaboración propia)

Las entradas de productos de LI o recuperaciones en este ejemplo de aplicación vienen dadas, mayoritariamente, por incidencias en las ventas o finalización del periodo de exposición de los productos. Cada caso de LI que se da en este tipo de productos se puede englobar en una de las siguientes categorías:

- **Producto en perfecto estado.** En estos casos el cliente no quiere el sillón por motivos ajenos al estado del producto, de manera que el sillón se reintroduce en el mercado porque se encuentra perfectamente.
- **Producto que no está en perfecto estado.** Cuando algún producto llega de nuevo a la fábrica, pero no se encuentra en perfecto estado (deterioro por el transporte, fallo de mecanismo, tela rajada o con algún desperfecto, desgaste por estar de exposición, ...), se cuenta con tres opciones diferentes para su disposición:
  - se puede vender el sillón directamente, tal cual esté, en un mercado secundario tipo outlet,
  - se puede reacondicionar para sacarlo de nuevo el mercado como nuevo,
  - se puede desmontar y tratar de aprovechar sus componentes para incluirlos, los que sean válidos, en nuevos modelos y los que no, reciclarlos.

Actualmente, la empresa sigue una **política de decisión fija** sobre la disposición de productos de LI que se expone a continuación:

- **Producto en perfecto estado.** Si el sillón se encuentra en perfectas condiciones, y su devolución es por una causa ajena al estado del producto, se vuelve a poner en el mercado primario con las mismas condiciones que un sillón nuevo.
- **Producto que no está en perfecto estado.** Existen tres opciones diferentes para su disposición:
  - a) Si el sillón es recuperado de alguna feria, exposición o después de estar de muestra en alguna tienda, directamente se negocia un precio de segunda mano y es vendido en el mercado secundario tipo outlet.

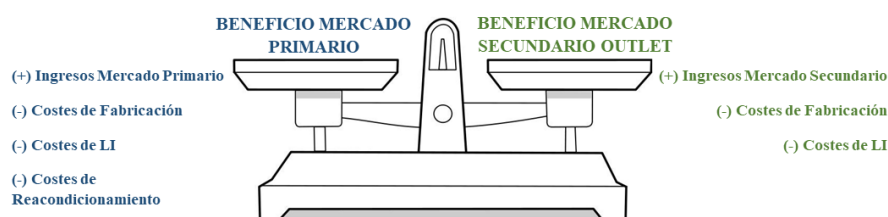
- b) Si el sillón no está en un estado suficientemente bueno como para tener salida en el mercado secundario, es desensamblado y se reciclan sus componentes tratando de venderlos a empresas interesadas.

En base a esta política fija de decisiones, ante un caso de LI, la empresa pretenderá reintroducir el producto en el mercado con la mayor rentabilidad y lo más pronto posible, cosa que no le resultará excesivamente complicado si el producto se encuentra en perfecto estado. El problema se plantea cuando el sillón no se encuentra en perfecto estado y, por lo tanto, no es apto para regresar directamente al mercado original. En esos casos, ante la idea de obtener el máximo rendimiento, basándose en la mínima intervención y el menor impacto ambiental, la alternativa preferente para la empresa es tratar de vender el sillón directamente a menor precio en un mercado secundario tipo outlet.

Generalmente, el nuevo precio de venta vendrá dado por el grado de imperfección o deterioro en el que se encuentre el producto, pero también puede darse el caso de que el reacondicionamiento del producto no sea excesivamente costoso y, tras la intervención, el sillón pueda ser reintroducido en el mercado como un producto nuevo a un precio más elevado. En esos casos, el coste de reacondicionamiento debería hacer fluctuar la decisión entre la alternativa de venta por outlet o el reacondicionamiento.

De esta forma, el grado de imperfección o deterioro del sillón determinará, en gran medida, parámetros muy influyentes sobre la alternativa de disposición a elegir, como son el **precio de venta outlet** o el **coste de reacondicionamiento** del sillón.

Como se puede apreciar en la figura siguiente (Figura 212), el beneficio del mercado primario viene dado por la diferencia entre los ingresos obtenidos en dicho mercado y los costes de fabricación, de LI y de reacondicionamiento del producto. Así mismo, el beneficio del mercado secundario es generado por la diferencia entre los ingresos del mercado secundario y los costes de fabricación y de LI.



**Figura 212.** Equilibrio entre el beneficio del mercado primario y secundario (Elaboración propia)

Asumiendo que los costes de fabricación y de LI son similares en ambos casos, resultará económicamente más ventajoso el mercado secundario cuando los ingresos obtenidos sean superiores a la diferencia entre los ingresos del mercado primario y los costes de reacondicionamiento. Asimismo, también puede darse el caso de que el precio de venta en el mercado secundario y la intervención necesaria para reacondicionar el producto no haga rentable o viable su venta, y sea más conveniente desmontar el producto y aprovechar los componentes para la elaboración de nuevos productos.

Las características de cada caso concreto condicionan la mejor alternativa de disposición, por ello, será interesante utilizar el MR como herramienta de ayuda en la toma de decisión y escoger la mejor alternativa en cada caso.

Tal y como se ha visto en el capítulo anterior, se ha desarrollado una metodología para poder adaptar los modelos generales del MR a modelos particulares, según las condiciones de cada PLI, obteniendo un modelo de proceso de negocio con el subproceso de solución y un MM adaptado a la realidad del PLI del caso concreto.

De este modo, una vez se tienen los modelos particulares, se estará en disposición de recuperar productos y tomar la decisión sobre la disposición más adecuada de cada uno de ellos en el día a día de la empresa con ayuda de la herramienta matemática. Sin embargo, para poder ejecutar la herramienta matemática, además de la información ya introducida sobre los valores medios de los parámetros, hay que acabar de parametrizarla e introducir valores en base a la casuística de cada producto que va llegando. Obviamente, esta información no se ha podido introducir antes en la herramienta porque, hasta que el cliente no contacta con la empresa, se desconoce. Para poder ayudar en estas tareas del día a día al usuario que se encarga de tomar la DD con la herramienta matemática, se va a desarrollar un manual de usuario que sirva de guía, fundamentalmente, para terminar de parametrizar los valores que aún no se conocían.

Por tanto, el objetivo del capítulo será aplicar la metodología de adaptación del modelo genérico integrado al caso de los sillones de relax, obteniendo así el modelo genérico particular. Una vez se haya desarrollado el modelo genérico particular y se esté en disposición de utilizarlo en el día a día de la empresa para tomar la decisión de tratamiento más idónea respecto a cada producto que se vaya recuperando, se desarrollará *el manual de usuario para la gestión de las recuperaciones* que servirá de ayuda al encargado de la

herramienta para terminar de conocer y parametrizar los valores necesarios para la ejecución de la herramienta matemática. Finalmente, se ejemplificará la aplicación del manual de usuario para determinar la mejor disposición en tres situaciones de producto recuperado.

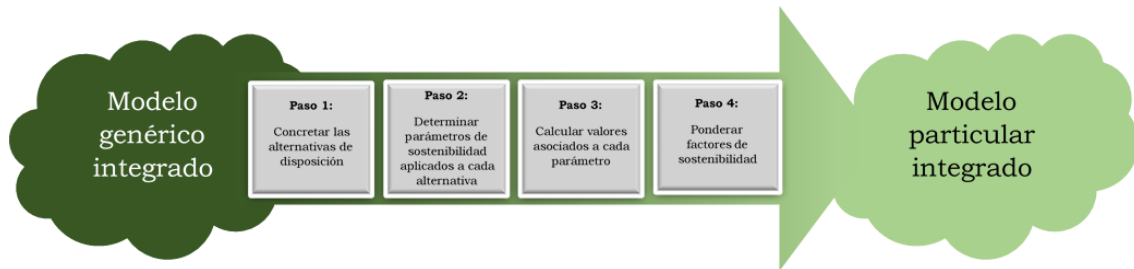
Para ello, en la siguiente sección (sección 14.2), se adapta el modelo genérico integrado al caso concreto de los sillones de relax, siguiendo los pasos de la metodología desarrollada a tal efecto:

1. Concretar las alternativas de disposición
2. Determinar los parámetros de sostenibilidad aplicables a las alternativas
3. Calcular los valores asociados a cada parámetro
4. Ponderar factores de sostenibilidad

El resultado de esta adaptación será un modelo particular integrado, compuesto por el modelo particular del PLI, que incorporará el subproceso de solución, y el modelo matemático particular. En la sección 14.3 se desarrolla el “manual de usuario para la gestión de las recuperaciones”. En la sección 14.4 se aplica el manual de usuario a tres ejemplos reales. Los resultados obtenidos se analizan en la sección 14.5. Posteriormente, en la sección 14.6, se plantean las conclusiones generales del capítulo, en la sección 14.7 se exponen las referencias utilizadas y en la sección 14.8 se anexan los modelos de programación MPL utilizados en el ejemplo de aplicación de los sillones de relax.

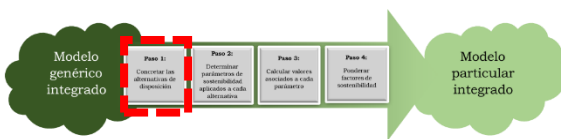
## **14.2. Adaptación del modelo genérico integrado al ejemplo de aplicación de sillones de relax: aplicación de la metodología de adaptación.**

A continuación, se aplica la metodología de adaptación del modelo genérico integrado al ejemplo de aplicación, siguiendo los pasos expuestos en el capítulo anterior y resumidos en la siguiente figura (Figura 213):



**Figura 213.** Metodología de adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado  
(Elaboración Propia)

### 14.2.1. Paso 1. Concretar las alternativas de disposición.



El modelo genérico integrado proporciona toda la casuística posible del PLI y su adaptación al caso particular consiste

precisamente en seleccionar, de esa casuística posible, cuáles son las alternativas que aplican en este caso. Para ello, se va a utilizar la tabla diseñada a tal efecto en la metodología de adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado (Tabla 23) donde se muestran las ocho posibles alternativas de disposición:

Alternativas de disposición	
	1.- Reutilización
	2.- Reparación
	3.- Reacondicionamiento
	4.- Remanufacturación
	5.- Canibalización
	6.- Reciclaje
	7.- Incineración
	8.- Vertido

**Tabla 23.** Posibles alternativas de disposición para seleccionar si se aplican al ejemplo de aplicación o no  
(Elaboración propia).



En esta tabla, además, se van a marcar las alternativas que son aplicables al ejemplo de aplicación de los sillones de relax y las que no, a través de la simbología siguiente:



*Alternativa que se aplica al ejemplo de aplicación*



*Alternativa que no se aplica al ejemplo de aplicación*

A continuación, se van a **revisar las alternativas una a una** para ver cuáles procede considerar en el ejemplo de aplicación porque sean aplicables y cuales no son consideradas. Al tratarse de una CdS de lazo cerrado, la misma empresa productora de los sillones es la encargada de recuperarlos y decidir la alternativa de disposición más interesante de entre las siguientes posibilidades:

**1. Reutilización.** Sin intervención sobre el producto y con la finalidad de reintroducción al mercado.

Se interviene lo menos posible sobre el sillón para volver a sacarlo al mercado. En esta alternativa, se intenta incurrir en pocos gastos en las operaciones de puesta a punto (limpieza, etiquetado, embalaje, almacenaje, ...). En este ejemplo de aplicación, se consideran dos tipos diferentes de reutilización, según el canal de venta:

- **Reutilización/reventa directa en mercado primario.** En esta alternativa se vuelve a poner el sillón a disposición del público, a través del canal habitual, como un producto nuevo. Se tratará de la opción más rentable para la empresa y la prioritaria, por ser la que menor intervención requiere (menor impacto ambiental) y mayores ingresos reporta (mayor rentabilidad económica).
- **Reutilización/reventa directa en mercado secundario tipo “outlet”.** En estos casos, el sillón sigue siendo apto para su utilización, pero los estándares de calidad no son los de un producto nuevo, por ello se recurre a un mercado secundario. Por tanto, dicho producto es sacado de nuevo al mercado, por un canal diferente que el caso anterior y con un precio sensiblemente inferior.

**2. Reparación.** Con intervención sobre el producto y con la finalidad de reintroducción en el mercado.

Los sillones de relax no son reparados por la empresa analizada, ya que el grado de intervención sobre los productos recuperados es mayor, dejándolo como nuevo a través del reacondicionamiento.

**3. Reacondicionamiento.** Con intervención sobre el producto y con la finalidad de reintroducción en el mercado.

En este caso, el sillón no se encuentra en perfecto estado y se debe intervenir sobre él para reacondicionarlo y poder sacarlo al mercado primario como nuevo.

Este proceso puede ser muy variable en función de la intervención que requiera el producto, de manera que habrá que medir muy bien el coste referente al reacondicionamiento (transporte, intervención, almacenaje, ...) y el precio de venta al mercado, para que el producto siga siendo rentable. En este sentido, el reacondicionamiento se fusiona con la reparación y la remanufactura, pero tal vez el término de reacondicionamiento sea el más apropiado porque realmente, en este caso, se revisa todo el producto y, aquel componente que no se encuentra en perfecto estado, se suele sustituir por uno nuevo, para sacar el producto al mercado con el mismo precio y nivel de calidad, como mínimo, que al principio.

**4. Remanufacturación.** Con intervención sobre el producto y con la finalidad de reintroducción en el mercado.

Siguiendo las indicaciones del apartado anterior, la intervención realizada por parte de la empresa sobre el producto recuperado, para volver a sacarlo al mercado, es considerada como reacondicionamiento y no como remanufacturación, debido a que los componentes que no funcionan bien no son remanufacturados, sino que son sustituidos por componentes nuevos.

**5. Canibalización.** Con intervención sobre el producto y con la finalidad de aprovechamiento de componentes.

Inicialmente se desmonta el producto para trabajar con sus componentes y aprovecharlos para ser reincorporados a otros productos. Tanto la estructura, como el motor y el tapizado se pueden aprovechar para la elaboración de nuevos sillones de relax.

**6. Reciclaje.** Con intervención sobre el producto y con la finalidad de aprovechamiento de componentes.

Los componentes del sillón de relax pueden ser reciclados completamente, ya que, tanto la estructura, como el motor y el tapizado se depositan en un punto limpio para que sean empresas externas especializadas las encargadas de su recogida y disposición. En el caso del tapizado, por ejemplo, la piel es un elemento fundamental para actividades como la marroquinería o la cetrería, por tanto, se puede vender “fácilmente” para que sea utilizada como materia prima de nuevos componentes (pulseras, bolsos, carteras, guantes, ...).




**7. Incineración.** Eliminación sin recuperación de valor.

Todos los componentes del producto son aprovechados mediante la canibalización o el reciclaje, no dejando opción a quemar ningún componente sin opción de recuperar valor.

**8. Vertido.** Eliminación sin recuperación de valor.

Del mismo modo que el caso anterior, no se considera que ningún componente sea eliminado, tras un vertido, sin opción de recuperar valor.

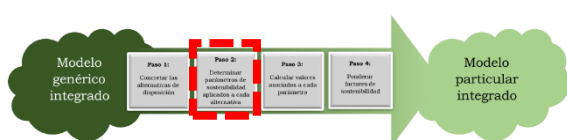
Tras la revisión de todas las alternativas de disposición, se muestra en la siguiente tabla (Tabla 24) cuáles son aplicables y cuáles no:

Alternativas de disposición	
	1.- Reutilización a) Mercado Primario b) Mercado Secundario
	2.- Reparación
	3.- Reacondicionamiento
	4.- Remanufacturación
	5.- Canibalización

✔	6.- Reciclaje
✘	7.- Incineración
✘	8.- Vertido

**Tabla 24.** Alternativas de disposición aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

### 14.2.2. Paso 2. Determinar parámetros de sostenibilidad aplicados a cada alternativa.



Una vez concretadas las alternativas aplicables al ejemplo de aplicación se determinan cuáles son los parámetros de

sostenibilidad adecuados a cada alternativa, según el caso concreto. Para ello, se revisan todos los parámetros definidos en el Capítulo 9 (Apartado 9.4.2.1) y se eliminan aquellos que no sean aplicables al ejemplo de aplicación.

#### 14.2.2.1. *Parámetros económicos*

- **Ingresos.**

Siguiendo la estructura planteada en la identificación de los aspectos económicos a considerar en cada alternativa (Apartado 9.3.1.1), se expone a continuación la estructura de ingresos relacionados con las alternativas de LI:



**Figura 214.** Estructura de ingresos relacionados con la LI con el desglose de los ingresos comunes y de los otros ingresos (Elaboración propia).

A continuación, se van a **revisar todos los posibles ingresos relacionados con la LI** identificados en el Marco de Referencia para ver cuáles procede considerar en el ejemplo de aplicación porque sean aplicables y cuales no procede considerar.

Ingresos obtenidos por reintroducción en el mercado:

Según las alternativas con la finalidad de reintroducción al mercado posibles en el ejemplo de aplicación se establecen los ingresos obtenidos en este apartado. Al contemplar dos alternativas diferentes de reutilización, se consideran dos ingresos diferentes en función de la alternativa escogida: reutilización/reventa como nuevo (**S<sub>reu<sub>i</sub></sub>**) o reutilización/reventa como producto outlet o mercado secundario (**S<sub>out<sub>i</sub></sub>**). Además de la reutilización, otra alternativa aplicable al ejemplo de aplicación con la finalidad de reintroducción en el mercado es el reacondicionamiento, por tanto, otro ingreso aplicable es el ingreso por venta del producto reacondicionado (**S<sub>ref<sub>i</sub></sub>**). El resto de las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (reparación y remanufacturación) no son contempladas en el caso de los sillones de relax, por tanto, no se aplican los ingresos por este tipo de disposición.

Ingresos obtenidos por aprovechamiento de componentes:

Según las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes posibles en el ejemplo de aplicación se establecen los ingresos obtenidos en este apartado. Se contempla, por tanto, los ingresos por la canibalización del componente (**Scan<sub>ij</sub>**) y los ingresos por el reciclaje del componente (**Srec<sub>ij</sub>**).

Ingresos obtenidos por generación de energía

Debido a que la generación de energía se obtiene tras la alternativa de incineración y esta alternativa no está contemplada en el caso de los sillones, no se cuenta con este tipo de ingresos para el ejemplo de aplicación.

Otros ingresos comunes a todas las alternativas:

No existen subvenciones ni ayudas aplicables al tratamiento de sillones de relax ni de sus componentes. Por ello, este tipo de ingresos no está contemplado en el presente ejemplo de aplicación.

○ **Costes.**

Siguiendo la estructura planteada en la identificación de los aspectos económicos a considerar en cada alternativa (Apartado 9.3.1.2) se expone a continuación la estructura de costes relacionados con las alternativas de LI:



**Figura 215.** Estructura de costes relacionados con la LI con el desglose de los costes comunes y específicos (Elaboración propia).

A continuación, se van a **revisar todos los posibles costes relacionados con las alternativas de disposición de LI** para ver cuáles procede considerar en el ejemplo de aplicación porque sean aplicables y cuales no deben ser considerados.

Costes comunes a todas las alternativas de disposición:

En el caso de los sillones de relax, se consideran costes comunes a todas las opciones, el coste de recuperación del producto ( $CP_i$ ) ya que es probable que se tenga que abonar total o parcialmente el coste de adquisición del producto al cliente. También habrá que hacer frente al coste de transporte del producto desde el cliente hasta la empresa ( $CT_{1i}$ ). Se tendrá en cuenta el coste de inspección y clasificación ( $CIS_i$ ), incluyendo en él el coste de recogida y almacenaje ( $COL_i$ ) y el coste de limpieza ( $CLE_i$ ), debido a la simplicidad de operaciones que, para este ejemplo de aplicación, significa.

Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado:

Se consideran para estos casos los costes de embalaje y puesta a punto del sillón ( $COP_i$ ), el coste de almacenaje previo a la entrega ( $CS_{1i}$ ) y el posterior transporte hasta el nuevo cliente del sillón de relax ( $CT_{2i}$ ).

Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:

El primer coste común a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (reciclaje y canibalización) será el coste de desmontaje del producto en componentes ( $CDIS_{ij}$ ). Este coste no se incluye en el MR como coste común debido a que en el modelo genérico el desmontaje está supuesto dentro de las operaciones propias de canibalización o reciclaje, porque puede llevar un desmontaje diferente para cada alternativa. En este caso, el desmontaje es similar a ambas y, por esa misma razón, se introduce el coste de desmontaje como coste común a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes.

Además de este, se consideran comunes también el coste de etiquetado ( $CL_{i,j}$ ), el de almacenaje ( $CS_{2i,j}$ ) y el coste de transporte ( $CT_{3i,j}$ ) del componente después de ser desmontado hasta la empresa que lo vaya a tratar.

Costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto sin recuperación de valor:

En este ejemplo de aplicación no se contempla ninguna alternativa con la finalidad de eliminación del producto sin recuperación de valor, por tanto, los costes comunes a dichas alternativas no son aplicables al caso de los sillones de relax.

Costes específicos de cada alternativa de disposición:

Respecto a las alternativas de disposición que no se contemplan en el ejemplo de aplicación (reparación, remanufacturación, incineración y vertido) evidentemente no se tienen en cuenta sus costes específicos para este estudio.

Para las alternativas que, si están disponibles en el caso de los sillones de relax, la única alternativa que cuenta con costes específicos es el reacondicionamiento de los sillones ( $C_{refi}$ ). En el resto de las alternativas viables, los costes se reparten entre costes comunes respecto a varias



alternativas. Además, en el caso del reciclaje, son empresas externas las que tratan los componentes y ellos mismos son los que acuden a la empresa para recogerlos y en el caso de la canibalización, los componentes se reintroducen en el proceso de fabricación, por tanto, no se considera un coste específico de reciclaje ( $C_{rec,i,j}$ ) ni de canibalización ( $C_{can,i,j}$ ).

A continuación, se muestra una tabla (Tabla 25) donde se marcan los parámetros que son aplicables al ejemplo de aplicación, respecto a todos los parámetros recogidos en el marco genérico. Se utiliza una marca verde para los parámetros que son aplicables y una marca roja para los que no se aplican en el ejemplo de aplicación. En línea con el código de colores utilizado en las figuras de ingresos y costes, cada parámetro se ha coloreado según el tipo de parámetro al que pertenece (verde – parámetros comunes según finalidad, marrón – comunes para todas las alternativas y azul – específicos para cada alternativa).

INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
✓	<b>Sreui</b>	ingresos por reutilización del producto i como nuevo
✓	<b>Sout<sub>i</sub></b>	ingresos por reutilización del producto i en el mercado secundario
✗	<b>Srep<sub>i</sub></b>	ingresos por reparación del producto i
✓	<b>Sref<sub>i</sub></b>	ingresos por reacondicionamiento del producto i
✗	<b>Srem<sub>i</sub></b>	ingresos por remanufacturación del producto i
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
✓	<b>Scan<sub>i,j</sub></b>	ingresos por canibalización del componente j obtenido del producto i
✓	<b>Srec<sub>i,j</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente j obtenido del producto i
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:		
✗	<b>Sbur<sub>i,j</sub></b>	ingresos por incineración del componente j obtenido de producto i
OTROS INGRESOS COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		

✗	<b>SUB<sub>i,j</sub></b>	ingresos obtenidos por subvención de gestión del componente j obtenido del producto i
<b>COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
✔	<b>CP<sub>i</sub></b>	coste de recuperación del producto i desde el cliente
✔	<b>CT<sub>1i</sub></b>	coste de transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa
✗	<b>COL<sub>i</sub></b>	coste de recogida y almacenaje del producto i
✗	<b>CLE<sub>i</sub></b>	coste de limpieza del producto i
✔	<b>CIS<sub>i</sub></b>	coste de inspección y clasificación del producto i
<b>COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
✔	<b>COP<sub>i</sub></b>	coste de embalaje del producto i para reutilización o reventa
✔	<b>CS<sub>1i</sub></b>	coste de almacenaje del producto i antes de la reutilización o reventa
✔	<b>CT<sub>2i</sub></b>	coste de transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
✔	<b>CDIS<sub>ij</sub></b>	Coste de desensamblaje del componente j del producto i ( <b>se introduce como coste común en este ejemplo de aplicación</b> )
✔	<b>CL<sub>i,j</sub></b>	coste de etiquetado del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización
✔	<b>CS<sub>2i,j</sub></b>	coste de almacenaje del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización
✔	<b>CT<sub>3i,j</sub></b>	coste de transporte del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización
Costes Comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto sin recuperar valor		

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

⊗	<b>CS<sub>3i,j</sub></b>	coste de almacenaje del componente j del producto i antes de ser incinerado o vertido
⊗	<b>CT<sub>4i,j</sub></b>	coste de transporte del componente j del producto i antes de ser incinerado o vertido
<b>COSTES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
⊗	<b>Crep<sub>i</sub></b>	coste de reparación del producto i
✔	<b>Cref<sub>i</sub></b>	coste de reacondicionamiento del producto i
⊗	<b>Crem<sub>i</sub></b>	coste de remanufacturación del producto i
⊗	<b>Ccan<sub>i,j</sub></b>	coste de canibalización del componente j del producto i
⊗	<b>Crec<sub>i,j</sub></b>	coste de reciclaje del componente j del producto i
⊗	<b>Cbur<sub>i,j</sub></b>	coste de incineración del componente j del producto i
⊗	<b>Crm<sub>i,j</sub></b>	coste de gestión de los residuos del componente j del producto i
⊗	<b>Cdis<sub>i,j</sub></b>	coste de vertido del componente j del producto i

**Tabla 25.** Parámetros económicos aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

A continuación, se muestra una nueva figura (Figura 216) en la que se combina la estructura de ingresos y costes con los parámetros económicos:

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

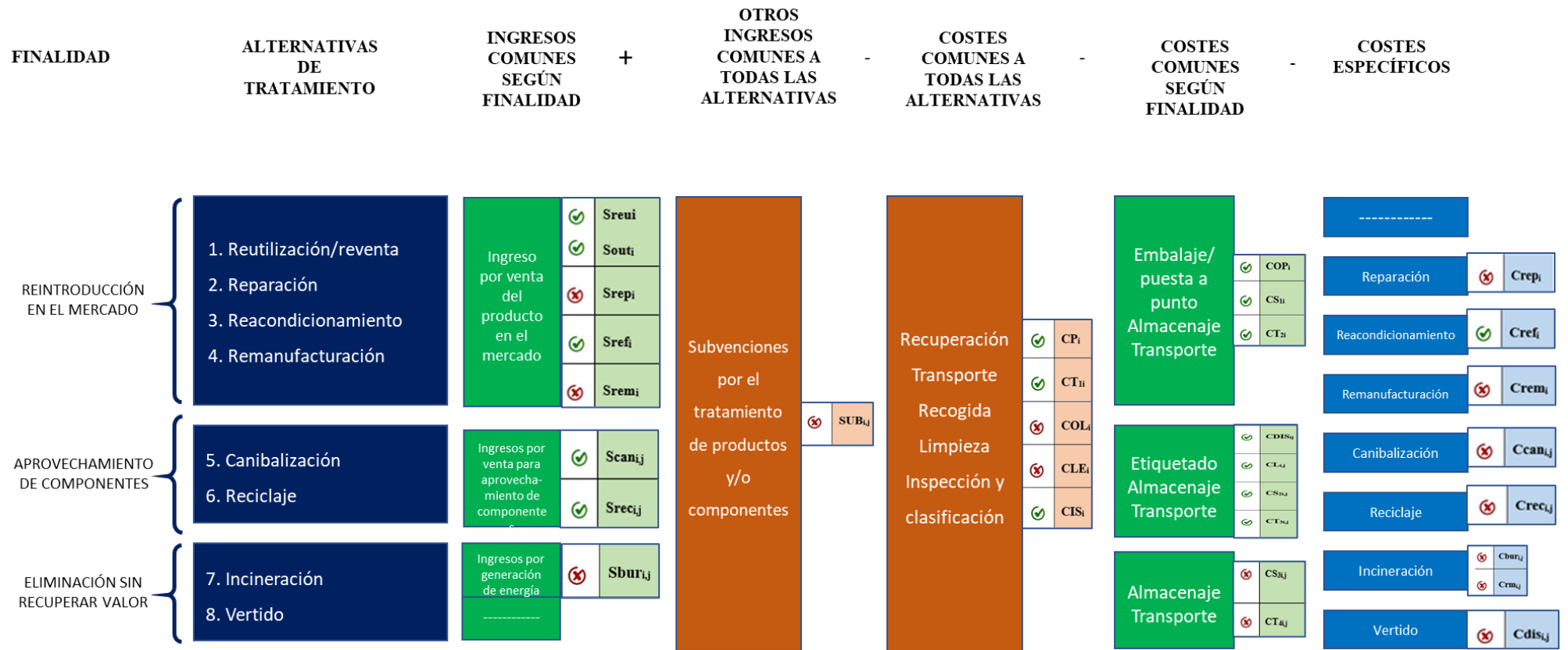


Figura 216. Combinación de la estructura de ingresos y costes con los parámetros económicos aplicables al ejemplo (Elaboración propia).

14.2.2.2. *Parámetros ambientales*

Siguiendo la estructura planteada en la identificación de los aspectos ambientales a considerar en cada alternativa (apartado 9.4.2.2) se expone a continuación la estructura de aspectos ambientales relacionados con las alternativas de LI:



**Figura 217.** Estructura de aspectos ambientales relacionados con la LI con el desglose de los aspectos ambientales comunes y específicos (Elaboración propia).

A continuación, se van a **revisar todos los posibles parámetros, relacionados con cada uno de los aspectos ambientales de las alternativas de disposición de LI**, para ver cuáles procede considerar en el ejemplo de aplicación de los sillones de relax porque sean aplicables y cuales no son considerados.

Parámetros ambientales comunes a todas las alternativas:

Se considera común a todas las alternativas, el impacto ambiental del transporte del sillón de relax desde el cliente hasta la empresa, correspondiendo el parámetro **EIT<sub>ii</sub>**.

Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado:

Todas las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado contempladas en el presente ejemplo de aplicación

(reutilización en el mercado primario o secundario y reacondicionamiento) contarán con el impacto ambiental dado por el transporte del producto desde la empresa hasta el cliente final, correspondiendo el parámetro **EIT<sub>2i</sub>**.

Asimismo, todas las intervenciones sobre los productos que van a ser reintroducidos en el mercado se realizan en las mismas instalaciones, por tanto, el impacto ambiental de transporte desde el centro de recolección hasta la zona en la que se interviene sobre el producto (**EIT<sub>3i</sub>**) no se considera en el presente ejemplo de aplicación.

Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:

Se contempla como aspecto común a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (reciclaje y canibalización), el transporte desde la empresa hasta el punto de tratamiento. En este ejemplo de aplicación, la alternativa de reciclaje contará con dicho aspecto porque las tareas de reciclaje las realizan empresas externas. En cambio, dicho aspecto se considera nulo para la canibalización, ya que estas operaciones se realizan en las mismas instalaciones. El aspecto ambiental del transporte de los componentes del sillón de relax desde la empresa hasta el centro de reciclaje tiene asignado el siguiente parámetro: **EIT<sub>3ij</sub>**.

Las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (reciclaje y canibalización) también tienen en común el desmontaje del sillón de relax en componentes (correspondiéndole el parámetro **EIP<sub>1ij</sub>**) que, como se ha explicado anteriormente, en este ejemplo de aplicación se contempla como común a ambas alternativas por ser el mismo desmontaje.

Parámetros ambientales comunes a las alternativas de eliminación del producto sin recuperación de valor:

En este ejemplo de aplicación no se contempla ninguna alternativa con la finalidad de eliminación del producto sin recuperación de valor, por tanto,




los parámetros ambientales referentes a dichas alternativas no son aplicables al caso de los sillones de relax.

Parámetros ambientales específicos a cada alternativa de disposición:

Respecto a las alternativas de disposición que no se contemplan en el ejemplo de aplicación (reparación, remanufacturación, incineración y vertido) evidentemente no se tienen en cuenta sus parámetros ambientales específicos para este estudio.

Para las alternativas que, si están disponibles en el caso de los sillones de relax, se considera el impacto ambiental específico debido a las operaciones realizadas durante la intervención de reacondicionamiento del producto (**EIP<sub>2i</sub>**). Asimismo, se considera el impacto ambiental debido a las operaciones de reciclaje de cada componente (**EIR<sub>i,j</sub>**). El impacto ambiental de la canibalización se considera nulo, debido a que no se realiza ninguna operación mecánica y el desplazamiento se realiza de manera manual, a pocos metros de distancia.

A continuación, se presenta la tabla genérica de los parámetros ambientales, coloreados según el código empleado en los apartados anteriores (verde – parámetros comunes según finalidad, marrón – parámetros comunes para todas las alternativas y azul – parámetros específicos para cada alternativa), con la indicación de si son aplicables o no para el presente ejemplo:

PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
	<b>EIT<sub>1i</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa
PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
	<b>EIT<sub>2i</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente
	<b>EIT<sub>3i</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde el centro de decisión hasta la localización de la intervención

Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
✔	<b>EIT<sub>4i,j</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente j del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje o canibalización ( <b>en este ejemplo de aplicación es renombrada como EIT<sub>3i</sub></b> )
✔	<b>EIP<sub>1ij</sub></b>	Impacto ambiental del desmontaje del componente j del producto i ( <b>se introduce como impacto ambiental común en este ejemplo de aplicación</b> )
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperar valor		
✘	<b>EIT<sub>5i,j</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente j del producto i desde el centro de decisión hasta el centro eliminación por incineración o vertido
PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
✘	<b>EIP<sub>1i</sub></b>	impacto ambiental de reparación del producto i
✔	<b>EIP<sub>2i</sub></b>	impacto ambiental de reacondicionamiento del producto i
✘	<b>EIP<sub>3i</sub></b>	impacto ambiental de remanufacturaación del producto i
✘	<b>EIP<sub>4i,j</sub></b>	impacto ambiental de canibalización del componente j del producto i
✔	<b>EIR<sub>i,j</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente j del producto i
✘	<b>EII<sub>i,j</sub></b>	impacto ambiental de incineración del componente j del producto i
✘	<b>EIL<sub>i,j</sub></b>	impacto ambiental de vertido del componente j del producto i

**Tabla 26.** Parámetros ambientales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

A continuación, se muestra una nueva figura (Figura 218) en la que se combina la estructura de impacto ambientales con los parámetros ambientales aplicables al ejemplo:



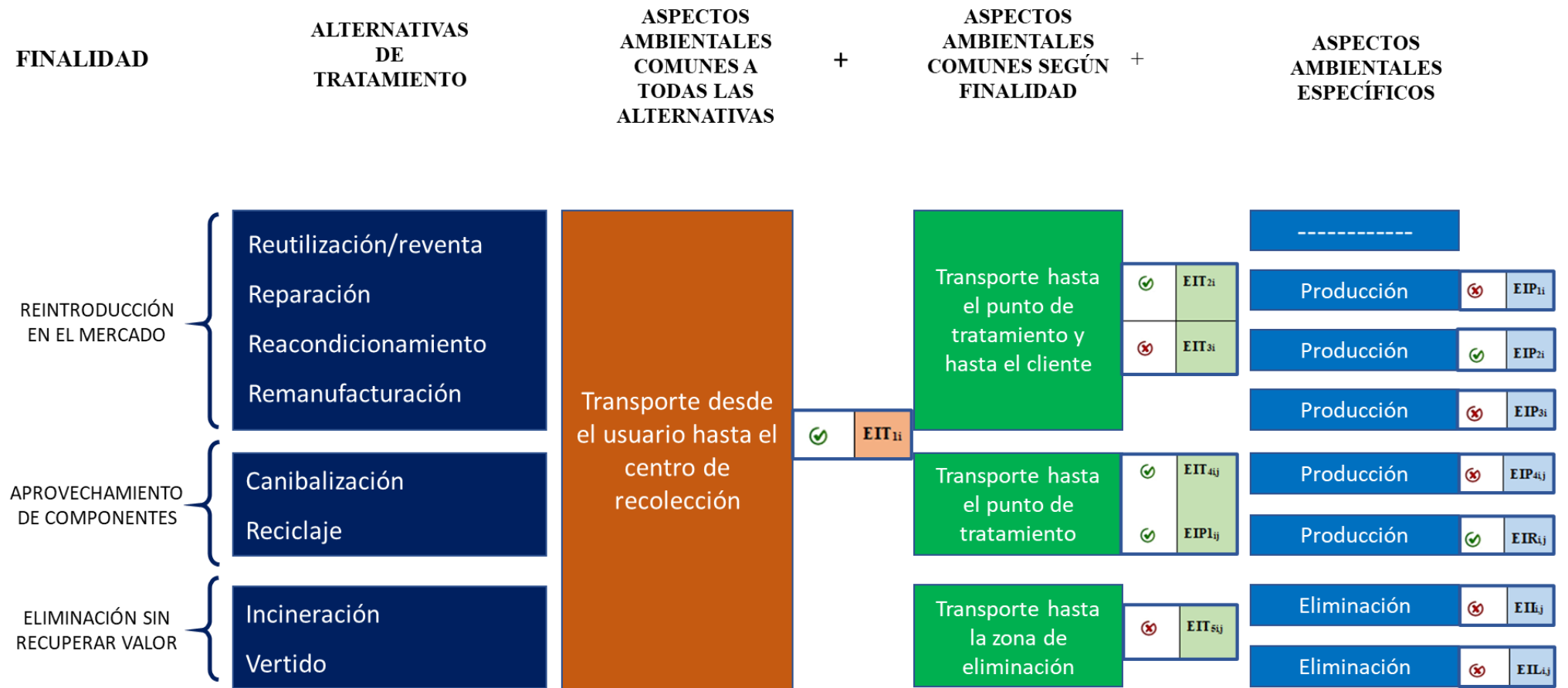
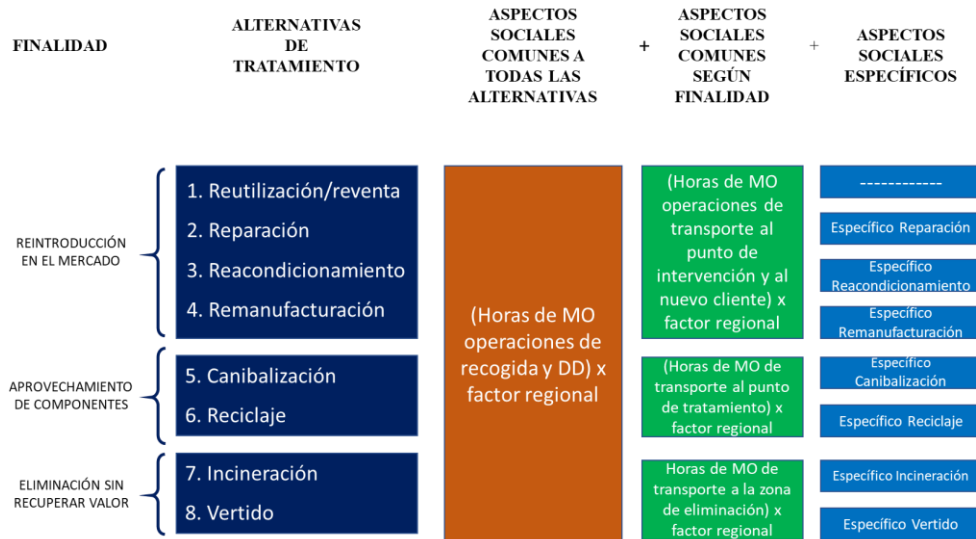


Figura 218. Combinación de la estructura de impacto ambiental con los parámetros ambientales aplicables al ejemplo (Elaboración propia)

14.2.2.3. *Parámetros sociales*

Siguiendo la estructura planteada en la identificación de los aspectos sociales a considerar en cada alternativa (apartado 9.4.2.3), se expone a continuación la estructura de aspectos sociales relacionados con las alternativas de LI:



**Figura 219.** Estructura de aspectos sociales relacionados con la LI con el desglose de los aspectos sociales comunes y específicos (Elaboración propia).

A continuación, se van a **revisar todos los posibles parámetros, relacionados con cada uno de los aspectos sociales de las alternativas de disposición de LI**, para ver cuáles procede considerar en el ejemplo de aplicación de los sillones de relax porque sean aplicables y cuales no son considerados

Parámetros sociales comunes a todas las alternativas:

Se considera común a todas las alternativas, el impacto social de las operaciones de recogida del sillón de relax desde el cliente hasta la empresa y la posterior DD, correspondiendo el parámetro  $W_{ii}$ , por el factor regional de la zona de realización de dichas operaciones, correspondiendo al parámetro  $\mu_{ii}$ .

Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado:

Todas las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado contempladas en el presente ejemplo de aplicación (reutilización en el

mercado primario o secundario y reacondicionamiento) contarán con el impacto social dado por las operaciones de reintroducción del producto en el mercado, correspondiendo el parámetro  $W_{2i}$ , por el factor regional de la zona de realización de dichas operaciones, correspondiendo al parámetro  $\mu_{2i}$ . En este ejemplo de aplicación, para diferenciar los mercados a los que se dirige el producto, se nombrara los parámetros del mercado primario como  $W_{2Ai} * \mu_{2Ai}$  y los parámetros del mercado secundario outlet como  $W_{2Bi} * \mu_{2Bi}$ .

Asimismo, todas las intervenciones sobre los productos que van a ser reintroducidos en el mercado se realizan en las mismas instalaciones, por tanto, el impacto social de transporte desde el centro de decisión hasta la zona en la que se interviene sobre el producto ( $W_{3i} * \mu_{3i}$ ) no se considera en el presente ejemplo de aplicación.

Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:

Se contempla como aspecto común a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (reciclaje y canibalización), el transporte desde la empresa hasta el punto de tratamiento. En este ejemplo de aplicación, la alternativa de reciclaje contará con dicho aspecto porque las tareas de reciclaje las realizan empresas externas. En cambio, dicho aspecto se considera nulo para la canibalización, ya que estas operaciones se realizan en las mismas instalaciones. El aspecto social del transporte de los componentes del sillón de relax desde la empresa hasta el centro de reciclaje tiene asignado el siguiente parámetro:  $W_{4ij} * \mu_{4ij}$ .

Las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (reciclaje y canibalización) también tienen en común el desmontaje del sillón de relax en componentes que, como se ha explicado anteriormente, en este ejemplo de aplicación se contempla como común a ambas alternativas por ser el mismo desmontaje, siendo incluido en el parámetro  $W_{4ij} * \mu_{4ij}$ .

Parámetros sociales comunes a las alternativas de eliminación del producto sin recuperación de valor:



En este ejemplo de aplicación no se contempla ninguna alternativa con la finalidad de eliminación del producto sin recuperación de valor, por tanto, los parámetros sociales referentes a dichas alternativas no son aplicables al caso de los sillones de relax.

Parámetros sociales específicos a cada alternativa de disposición:

Respecto a las alternativas de disposición que no se contemplan en el ejemplo de aplicación (reparación, remanufacturación, incineración y vertido) evidentemente no se tienen en cuenta sus parámetros sociales específicos para este estudio.

Para las alternativas que, si están disponibles en el caso de los sillones de relax, se considera el impacto social específico debido a las operaciones realizadas durante la intervención de reacondicionamiento del producto ( $W_{refi} * \mu_{refi}$ ). Asimismo, se considera el impacto social debido a las operaciones de reciclaje de cada componente ( $W_{reci} * \mu_{reci,j}$ ). El impacto social de la canibalización se considera nulo, debido a que no se realiza ninguna operación mecánica y el desplazamiento se realiza de manera manual, a pocos metros de distancia.

A continuación, se presenta la tabla genérica de los parámetros sociales, coloreados según el código empleado en los apartados anteriores (verde – parámetros comunes según finalidad, marrón – parámetros comunes para todas las alternativas y azul – parámetros específicos para cada alternativa), con la indicación de si son aplicables o no para el presente ejemplo:

PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
	$W_{1i} * \mu_{1i}$	Horas de MO de las operaciones de recogida del producto i y DD * factor regional correspondiente
PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
	$W_{2i} * \mu_{2i}$	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado * factor regional correspondiente

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.



	$W_{3i} * \mu_{3i}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del producto i desde el centro de decisión hasta el punto de intervención * factor regional correspondiente
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
	$W_{4ij} * \mu_{4ij}$	Horas de MO de las operaciones de desensamblaje y transporte del componente j del producto i al punto de tratamiento * factor regional correspondiente
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperar valor		
	$W_{5ij} * \mu_{5ij}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente j del producto i desde el centro de decisión hasta el centro eliminación por incineración o vertido * factor regional correspondiente
<b>PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
	$W_{rep_i} * \mu_{rep_i}$	Horas de MO de las operaciones de Reparación del producto i * factor regional correspondiente
	$W_{ref_i} * \mu_{ref_i}$	Horas de MO de las operaciones de Reacondicionamiento del producto i * factor regional correspondiente
	$W_{rem_i} * \mu_{rem_i}$	Horas de MO de las operaciones de Remanufacturaación del producto i * factor regional correspondiente
	$W_{can_{i,j}} * \mu_{can_{i,j}}$	Horas de MO de las operaciones de Canibalización del componente j del producto i * factor regional correspondiente
	$W_{rec_{i,j}} * \mu_{rec_{i,j}}$	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente j del producto i * factor regional correspondiente
	$W_{bur_{i,j}} * \mu_{bur_{i,j}}$	Horas de MO de las operaciones de Incineración del componente j del producto i * factor regional correspondiente
	$W_{dis_{i,j}} * \mu_{dis_{i,j}}$	Horas de MO de las operaciones de Vertido del componente j del producto i * factor regional correspondiente

Tabla 27. Parámetros sociales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

A continuación, se muestra una nueva figura (Figura 220) en la que se combina la estructura de impactos sociales con los parámetros sociales aplicables:



Figura 220. Combinación de la estructura de impacto social con los parámetros sociales aplicables al ejemplo (Elaboración propia)

### 14.2.3. Paso 3. Calcular valores asociados a cada parámetro de sostenibilidad.



El modelo matemático particular, planteado en el apartado anterior, se adapta al ejemplo de aplicación teniendo en cuenta los componentes del producto y las alternativas posibles. Para calcular los valores asociados a cada parámetro de sostenibilidad, en el caso de los sillones de relax, se van a considerar tres componentes principales en el producto:

- La estructura del sillón
- El motor y mecanismo eléctrico
- El tapizado.

El sillón relax de piel tiene un peso total de 45 kilogramos, donde la proporción de pesos se distribuye de la siguiente manera: Tapizado 60 % (27 kg), motor y mecanismo eléctrico 36 % (16'2 kg) y estructura 4% (1'8 kg). Dicha proporción será utilizada a lo largo del estudio para distribuir los datos del producto en su conjunto, entre los distintos componentes.

Los valores asociados son presentados a continuación, en base a un ejemplo genérico de sillón recuperado con los valores medio de los parámetros definidos en el apartado anterior.

#### 14.2.3.1. Valores económicos

Los valores económicos son obtenidos a través de la información que maneja la empresa sobre los ingresos y los costes asociados a los parámetros aplicables al presente ejemplo de aplicación. Se expresan a continuación los valores obtenidos según la clasificación de parámetros indicada en el modelo matemático:

Ingresos obtenidos por reintroducción en el mercado:

**Sreui**, ingreso del producto *i* por reutilización/reventa como nuevo: **650 €/ud** (mismo precio de venta que un sillón nuevo).

**Sout<sub>i</sub>**, ingreso del producto *i* por reutilización/reventa como producto de outlet o mercado secundario: **520 €/ud** (se descuenta un 20% en este caso, aunque puede oscilar generalmente entre un 20 y un 40%).

**Sref<sub>i</sub>**, ingreso del producto *i* como sillón reacondicionado: **650 €/ud** (mismo precio que como un sillón nuevo).

Ingresos obtenidos por aprovechamiento de componentes:

Todas las alternativas no son aplicables a todos los componentes, por tanto, sólo se plantean los ingresos por venta para aquellas alternativas viables a cada componente:

Estructura:

**Scan<sub>i1</sub>**, ingreso del componente *I*(*estructura*) obtenido del producto *i* por canibalización. Aunque este componente no se vende por sí solo, pero se aprovecha para la elaboración de un nuevo producto, la estructura está cuantificada en **131'56 €/ud.**

**Srec<sub>i1</sub>**, ingreso del componente *I* (*estructura*) obtenido del producto *i* para reciclaje. En este caso no se obtiene ningún ingreso, ya que la empresa que retira el componente compensa el tratamiento del componente con la retirada de este.

Motor/Mecanismo eléctrico:

**Scan<sub>i2</sub>**, ingreso del componente *2* (*motor*) obtenido del producto *i* por canibalización. Igual que el componente anterior, aunque este componente no se vende por sí solo, se aprovecha para la elaboración de un nuevo producto, donde el motor y el mecanismo eléctrico está valorado económicamente en **116'30 €/ud.**

**Srec<sub>i2</sub>**, ingreso del componente *2* (*motor*) obtenido del producto *i* para reciclaje. En este caso el ingreso que se obtiene por reciclaje está cifrado en una cantidad aproximada de 0'1 €/kg. Entendiendo que el peso del componente es 16'2 kg, el ingreso en esta alternativa sería de **1'62 €/ud.**

Tapizado:

**Scan<sub>i3</sub>**, ingreso del componente *3* (*tapizado*) obtenido del producto *i* por canibalización. Igual que los componentes anteriores, aunque este componente no



se vende por sí solo, se aprovecha para la elaboración de un nuevo producto donde el tapizado está cuantificado en **158'83 €/ud.**

**Srec<sub>3</sub>**, ingreso del componente 3 (*tapizado*) obtenido del producto *i* para reciclaje. En este caso, la piel es reciclable para productos de marroquinería y cetrería principalmente, pagando un precio de 4 €/kg. Entendiendo que en un sillón relax puede haber 27 kg de piel, el ingreso por el reciclaje de la piel sería de **108 €/ud.**

Costes Comunes a todas las alternativas de disposición:

**CP<sub>i</sub>**, coste de recuperación del producto *i* del cliente. En este caso, se plantea que el producto es abonado íntegramente el cliente, devolviendo el coste inicial del producto **650 €/ud.** En este caso, el coste de recuperación del producto influirá directamente con la rentabilidad del producto, pero no afectará sobre la alternativa a escoger, puesto que es común para todas ellas e independientemente de la alternativa escogida, el coste es el mismo.

**CT<sub>1i</sub>**, coste de transporte del producto *i* desde el cliente hasta la empresa. En este caso, se calcula un coste entre 10 y 15 €/ud, por lo que escoge un valor medio de **12'50 €/ud.** Cabe comentar en este punto que la empresa también tiene pactado con la empresa de transporte la excepción de pago en estos casos, en contraprestación a posibles daños causados a causa del transporte, aunque en este ejemplo el coste lo asuma la empresa.

**CIS<sub>i</sub>**, coste de inspección y clasificación del producto *i*. En este ejemplo, dicho coste incluye también la recogida y el almacenaje previo del producto antes de la inspección y clasificación. En este sentido, dicho coste está cifrado en la siguiente cantidad: **3 €/ud.**

Costes Comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado

**COP<sub>i</sub>**, coste de embalaje, o puesta a punto, del producto *i* para reutilización o reventa. Se entiende dentro de este coste, el embalaje, puesta a punto del sillón y la colocación del stock en el almacén, para poder sacarlo posteriormente al mercado. En este objeto de estudio, dicho coste se encuentra cifrado en: **10 €/ud.**

**CS<sub>1i</sub>**, coste de almacenaje del producto *i* antes de la reutilización o reventa. El coste del almacenaje está cifrado en 0'10 €/día por unidad (m<sup>2</sup>). Siendo el tiempo medio de permanencia del sillón en el almacén previo para ser vendido de 3 días, el coste de almacenaje se sitúa en: **0'30 €/ud.**

**CT<sub>2i</sub>**, coste de transporte del producto *i* desde la empresa hasta el nuevo cliente. Al igual que en el caso del transporte anterior, se calcula un coste entre 10 y 15 €/ud, por lo que escoge un valor medio de **12'50 €/ud.**

#### Costes Comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes

**CDIS<sub>ij</sub>**, coste de desensamblaje del producto *i* en componentes *j* antes de ser destinado para canibalización o reciclaje. Este coste se asume cada vez que un producto es desmontado para aprovechar sus componentes, independientemente del destino final de cada uno de ellos. Por norma general, dicha operación tarda aproximadamente una hora, cuantificada en **25 €/ud**. Distribuida dicha cantidad proporcionalmente entre los pesos de los componentes sobre el producto final quedaría de la siguiente manera:

- **Estructura (4%): 1 €/ud**
- **Motor/mecanismos (36 %): 9 €/ud**
- **Tapizado (60 %): 15 €/ud**

**CL<sub>ij</sub>**, coste de etiquetado del componente *j* del producto *i* después de ser desensamblado. En el presente ejemplo de aplicación no se realiza ningún etiquetado especial para los componentes, una vez designada la intervención siguiente a realizar, simplemente son depositados en lugares diferentes según la alternativa a aplicar, por lo que el coste se considera nulo.

**CS<sub>2ij</sub>**, coste de almacenaje del componente *j* del producto *i* después de ser desensamblado. Para los componentes que van a ser canibalizados, prácticamente el tiempo de almacenaje es inexistente, ya que son reintroducidos rápidamente en la cadena de fabricación y no incurren en un gasto propio de almacenaje por componente, por lo que el coste también se considera nulo.

Asimismo, para aquellos componentes que van a ser reciclados, también se considera despreciable, teniendo en cuenta el poco volumen que ocupa el

componente y el poco tiempo que suele permanecer en la empresa a la espera de ser recogido por la empresa recicladora.

**CT<sub>3ij</sub>**, coste de transporte del componente *j* del producto *i* después de ser desensamblado para ser tratado mediante canibalización o reciclaje.

Para aquellos componentes que son tratados para la **canibalización**, se considera el transporte desde el punto de desensamblaje hasta el lugar de aprovisionamiento de la cadena de fabricación. Debido a que el tiempo dedicado a dicho transporte es inferior a **cinco minutos**, ya que se trata en las mismas instalaciones, y redondeándolo al alza, para tratar de englobar el coste prácticamente despreciable del almacenamiento, el coste correspondiente al transporte de cada componente para canibalizar está cifrado en **3 €/ud.**

Del mismo modo que ocurre con la canibalización, pasa con el **reciclaje de los componentes**, ya que el desplazamiento entre las instalaciones es mínimo y el coste de almacenamiento es prácticamente despreciable. Por tanto, se considera el mismo importe de **3 €/ud** para los componentes que van a ser reciclados.

#### Costes específicos de cada alternativa de disposición

**Crefi**, coste de reacondicionamiento del producto *i*. Se considera como coste específico de esta alternativa, el coste de la intervención sobre el producto para dejarlo como nuevo y reintroducirlo en el mercado. Para cuantificar dicho coste, se valora el tiempo dedicado por término medio a esta operación, aproximadamente en 20 minutos (10 €), más el coste de los materiales necesarios para la puesta a punto del producto. En la mayor parte de las ocasiones se trata de un cambio de mecanismo eléctrico, cifrado en unos 55 €. Por tanto, para el presente ejemplo de aplicación, se cifra el coste específico de reacondicionamiento en **65 €/ud.**

En base a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, la empresa ya no incurre en ningún gasto más, ya que son empresas externas las que acuden a recoger los componentes para el caso del reciclaje, o pasan a ser costes de fabricación, para el caso de la canibalización, no se considera ningún coste específico a dichas alternativas. En el modelo genérico, el coste de desmontaje se incluye dentro del coste específico de canibalización y de reciclaje, contemplando

que pueda ser un desmontaje diferente. En este caso, se asume que el desmontaje es similar para ambas alternativas, por tanto, se considera como un coste común a días alternativas de disposición.

A continuación, se muestra una tabla resumen (Tabla 28) donde se indican los valores referidos a los parámetros económicos aplicables al ejemplo de aplicación. Los parámetros son coloreados según el ámbito de aplicación (verde – parámetros comunes según finalidad, marrón – parámetros comunes para todas las alternativas y azul – parámetros específicos para cada alternativa).

INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>Sreu<sub>i</sub></b>	650 €/ud	ingresos por reutilización del producto i como nuevo
<b>Sout<sub>i</sub></b>	520 €/ud	ingresos por reutilización del producto i en el mercado secundario
<b>Sref<sub>i</sub></b>	650 €/ud	ingresos por reacondicionamiento del producto i
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Scan<sub>i,1</sub></b>	131'56 €/ud	ingresos por canibalización del componente 1 (estructura) obtenido del producto i
<b>Srec<sub>i,1</sub></b>	0 €/ud	ingresos por reciclaje del componente 1 (estructura) obtenido del producto i
<b>Scan<sub>i,2</sub></b>	116'30 €/ud	ingresos por canibalización del componente 2 (motor) obtenido del producto i
<b>Srec<sub>i,2</sub></b>	1'62 €/ud	ingresos por reciclaje del componente 2 (motor) obtenido del producto i
<b>Scan<sub>i,3</sub></b>	158'83 €/ud	ingresos por canibalización del componente 3 (tapizado) obtenido del producto i
<b>Srec<sub>i,3</sub></b>	108 €/ud	ingresos por reciclaje del componente 3 (tapizado) obtenido del producto i
COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

<b>CP<sub>i</sub></b>	650 €/ud	coste de recuperación del producto i desde el cliente
<b>CT<sub>1i</sub></b>	12'50 €/ud	coste de transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa
<b>CIS<sub>i</sub></b>	3 €/ud	coste de inspección y clasificación del producto i
<b>COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>COP<sub>i</sub></b>	10 €/ud	coste de embalaje del producto i para reutilización o reventa
<b>CS<sub>1i</sub></b>	0'3 €/ud	coste de almacenaje del producto i antes de la reutilización o reventa
<b>CT<sub>2i</sub></b>	12'50 €/ud	coste de transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>CDIS<sub>1i</sub></b>	1 €/ud	Coste de desensamblaje del componente 1 (estructura) del producto i
<b>CDIS<sub>2i</sub></b>	9 €/ud	Coste de desensamblaje del componente 2 (motor) del producto i
<b>CDIS<sub>3i</sub></b>	15 €/ud	Coste de desensamblaje del componente 3 (tapizado) del producto i
<b>CL<sub>i,j</sub></b>	0 €/ud	coste de etiquetado del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización
<b>CS<sub>2i,j</sub></b>	0 €/ud	coste de almacenaje del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización
<b>CT<sub>3i,j</sub></b>	3 €/ud	coste de transporte del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización
<b>Costes específicos de cada alternativa de disposición</b>		
<b>Cref<sub>i</sub></b>	65 €/ud	coste de reacondicionamiento del producto i

**Tabla 28.** Valores económicos aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

**Valores de rentabilidad económica para cada Alternativa.**

El valor de la rentabilidad económica de cada alternativa de disposición se obtiene como la diferencia entre los ingresos y los costes referentes a cada una de ellas, tal y como se ha expuesto en el apartado 9.3. Para facilitar el seguimiento de los valores de rentabilidad

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

de cada alternativa, se expone en la figura siguiente (Figura 221) el desglose de ingresos (excepto el bloque de ingresos comunes a todas las alternativas porque no aplica en el ejemplo de aplicación) y costes que componen la rentabilidad de las alternativas de LI:

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD	COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD	COSTES ESPECÍFICOS		
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	1. Reutilización/reventa	Ingreso por venta del producto en el mercado	Recuperación Transporte Recogida Limpieza Inspección y clasificación	Embalaje/ puesta a punto Almacenaje Transporte	-----		
	2. Reparación				Reparación		
	3. Reacondicionamiento				Reacondicionamiento		
	4. Remanufacturaación				Remanufacturaación		
APROVECHAMIENTO DE COMPONENTES	5. Canibalización	Ingresos por venta para aprovechamiento de componentes		Recuperación Transporte Recogida Limpieza Inspección y clasificación	Etiquetado Almacenaje Transporte	Canibalización	
	6. Reciclaje					Reciclaje	
ELIMINACIÓN SIN RECUPERAR VALOR	7. Incineración	Ingresos por generación de energía			Recuperación Transporte Recogida Limpieza Inspección y clasificación	Almacenaje Transporte	Incineración
	8. Vertido						Vertido

Figura 221. Estructura de ingresos y costes que componen la rentabilidad económica de las alternativas de LI (Elaboración propia).

A continuación, se mostrará los parámetros económicos que hacen referencia a cada alternativa y sus valores correspondientes, obteniendo el valor de la rentabilidad económica de cada alternativa. Asimismo, se acompaña en cada alternativa una miniatura de la imagen anterior, destacando los parámetros aplicables a la alternativa en cuestión:

1. Alternativas de reintroducción en el mercado:

o Reutilización en el mercado primario como nuevo.

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD	COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD	COSTES ESPECÍFICOS	
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	1. Reutilización/reventa	Ingreso por venta del producto en el mercado primario	Recuperación Transporte Recogida Limpieza Inspección y clasificación	Embalaje/ puesta a punto Almacenaje Transporte	-----	
	2. Reparación					
	3. Reacondicionamiento					
	4. Remanufacturaación					

Los ingresos económicos que corresponden a esta alternativa vienen dados por el ingreso por venta del producto en el mercado primario ( $S_{reu_i} = 650 \text{ €/ud}$ ). Asimismo, los costes referentes a la

alternativa de reutilización vienen dados por los costes comunes a todas las alternativas ( $CP_i = 650 \text{ €/ud}$ ,  $CT_{i1} = 12'50 \text{ €/ud}$  e  $CIS_i = 3 \text{ €/ud}$ ) y los costes comunes según la finalidad de reintroducción en el mercado ( $COP_i = 10 \text{ €/ud}$ ,

$CS_{1i}=0'3 \text{ €/ud}$  y  $CT_{2i} = 12'50 \text{ €/ud}$ ). De esta manera, el valor de la rentabilidad económica (EP) de la alternativa de reutilización será de:

$$\underline{EP_{REU_i} = S_{reu_i} - CP_i - CT_{1i} - CIS_i - COP_i - CS_{1i} - CT_{2i} = -38'30 \text{ €/ud}}$$

o **Reutilización en el mercado secundario/outlet.**

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	INGRESOS COMUNES SEGUN FINALIDAD	COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	COSTES COMUNES SEGUN FINALIDAD	COSTES ESPECIFICOS
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	1. Reutilización/reventa	Ingreso por venta del producto en el mercado secundario	Recuperación Transporte Recogida Limpieza Inspección y clasificación	Embalaje/ puesta a punto Almacenaje Transporte	
	2. Reparación				
	3. Reacondicionamiento				
	4. Remanufactura				

Los ingresos económicos que corresponden a esta alternativa vienen dados por el precio de venta del producto en el mercado secundario ( $S_{out_i}=520 \text{ €/ud}$ ). Asimismo, los

costes de la alternativa de venta en el mercado secundario son los mismos que la alternativa anterior y vienen dados por los costes comunes a todas las alternativas ( $CP_i = 650 \text{ €/ud}$ ,  $CT_{1i} = 12'50 \text{ €/ud}$  e  $CIS_i = 3 \text{ €/ud}$ ) y los costes comunes según la finalidad de reintroducción en el mercado ( $COP_i = 10 \text{ €/ud}$ ,  $CS_{1i}=0'3 \text{ €/ud}$  y  $CT_{2i} = 12'50 \text{ €/ud}$ ). De esta manera, el valor de la rentabilidad económica de la alternativa de outlet será de:

$$\underline{EP_{OUT_i} = S_{out_i} - CP_i - CT_{1i} - CIS_i - COP_i - CS_{1i} - CT_{2i} = -168'30 \text{ €/ud}}$$

o **Reacondicionamiento.**

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	INGRESOS COMUNES SEGUN FINALIDAD	COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	COSTES COMUNES SEGUN FINALIDAD	COSTES ESPECIFICOS
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	Reutilización/reventa	Ingreso por venta del producto en el mercado	Recuperación Transporte Recogida Limpieza Inspección y clasificación	Embalaje/ puesta a punto Almacenaje Transporte	
	Reparación				
	Reacondicionamiento				Reacondicionamiento
	Remanufactura				

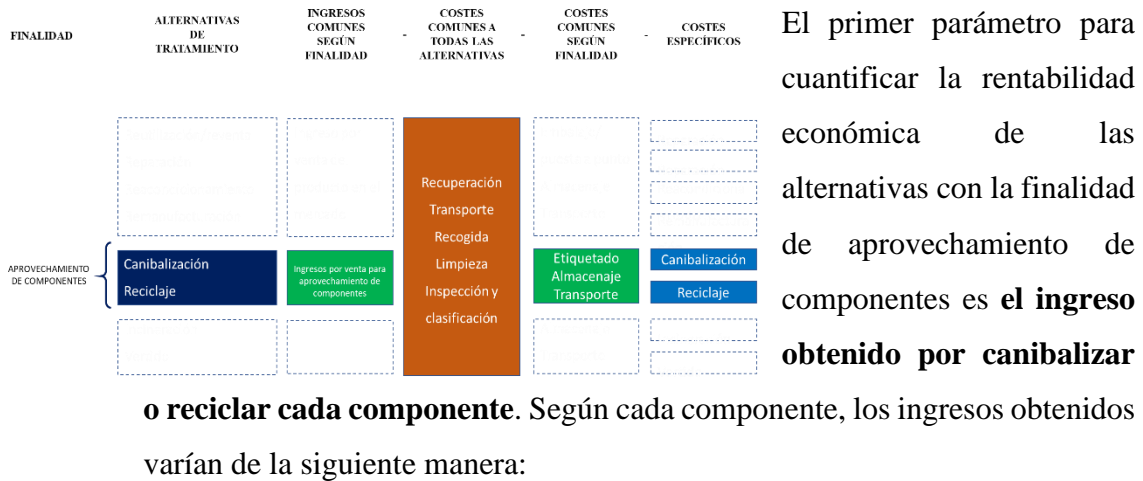
Los ingresos económicos que corresponden a esta alternativa vienen dados por el precio de venta del producto tras haber sido reacondicionado ( $S_{ref_i}=650 \text{ €/ud}$ ). Asimismo, los costes

de la alternativa de reacondicionamiento vienen dados por los costes comunes a todas las alternativas ( $CP_i = 650 \text{ €/ud}$ ,  $CT_{1i} = 12'50 \text{ €/ud}$  e  $CIS_i = 3 \text{ €/ud}$ ), los costes comunes según la finalidad de reintroducción en el mercado ( $COP_i = 10 \text{ €/ud}$ ,  $CS_{1i}=0'3 \text{ €/ud}$  y  $CT_{2i} = 12'50 \text{ €/ud}$ ) y los costes específicos de la alternativa

( $C_{refi} = 65 \text{ €/ud}$ ). De esta manera, el valor de la rentabilidad económica de la alternativa de reacondicionamiento será de:

$$\underline{EP_{REFi} = S_{refi} - CP_i - CT_{1i} - CIS_i - COP_i - CS_{1i} - CT_{2i} - C_{refi} = -103'30 \text{ €/ud}}$$

## 2. Aprovechamiento de Componentes.



- **Estructura.** Se contempla el ingreso por canibalización, cifrado en el valor de la estructura nueva, ( $S_{can11} = 131'56 \text{ €/ud}$ ) y por reciclaje ( $S_{rec11} = 0 \text{ €/ud}$ ), que es nulo ya que la empresa que recicla la estructura no abona nada por ello.
- **Motor/componentes eléctricos.** En este caso se contempla el ingreso por canibalización, como valor de los componentes nuevos, ( $S_{can12} = 116'30 \text{ €/ud}$ ) y por reciclaje ( $S_{rec12} = 1'62 \text{ €/ud}$ ), abonado por empresas externas.
- **Tapizado.** En este caso se contempla el ingreso por canibalización, como valor del componente nuevo, ( $S_{can13} = 158'83 \text{ €/ud}$ ) y por reciclaje ( $S_{rec12} = 108 \text{ €/ud}$ ), abonado por empresas externas.

El resto de los parámetros económicos considerados para determinar la rentabilidad de cada alternativa son **los costes que hacen referencia a cada una de ellas**. En este caso, se agrupan, por un lado, en aquellos que son **comunes a todas las alternativas de disposición** (no solo con esta finalidad), por otro lado, en aquellos que **son comunes sólo a las alternativas con dicha finalidad** y, por último, aquellos que **son específicos de cada alternativa**.



Los costes que son comunes a todas las alternativas son calculados como costes por unidad del producto ( $CP_i = 650 \text{ €/ud}$ ,  $CT_{1i} = 12'50 \text{ €/ud}$  e  $CIS_i = 3 \text{ €/ud}$ ) y deben estar presentes en su totalidad en cualquier combinación de alternativas de componentes. Por ello, como en toda alternativa que combine tratamiento de componentes se debe elegir una alternativa para cada componente, para poder calcular la rentabilidad económica en las alternativas que hacen referencia a los componentes, dichos valores son **distribuidos en función de la proporción de cada componente sobre el producto (4 % componente 1, 36% componente 2 y 60% componente 3)**.

Los costes que son comunes sólo a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, ( $CDIS_{ij} = 25 \text{ €/ud}$ ,  $CL_{ij} = 0 \text{ €/ud}$ ,  $CS2_{ij} = 0 \text{ €/ud}$  y  $CT_{3ij} = 3 \text{ €/ud}$ ), también **se reparten entre los componentes en función del porcentaje del peso del componente**, ya que en función del volumen y del peso de cada componente, el coste será diferente.

Los costes específicos de las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes son nulos en el presente ejemplo de aplicación debido a que los costes de canibalización son considerados como nuevos costes de fabricación y los costes de reciclaje son asumidos por empresas externas.

De este modo, los valores de rentabilidad, desglosados por alternativa y componente, quedarían de la siguiente manera:

**a) Canibalización.**

**(1) Estructura.**

$$\begin{aligned} EP_{i1can} &= \text{Scan}_{i1} - (CP_i - CT_{1i} - CIS_i) * 0'04 - CDIS_{i1} - CL_{i1} - CS2_{i1} - CT_{3i1} = \\ &= \underline{\underline{-94'273 \text{ €/ud}}} \end{aligned}$$

**(2) Motor/mecanismos eléctricos**

$$\begin{aligned} EP_{i2can} &= \text{Scan}_{i2} - (CP_i - CT_{1i} - CIS_i) * 0'36 - CDIS_{i2} - CL_{i2} - CS2_{i2} - CT_{3i2} = \\ &= \underline{\underline{-117'533 \text{ €/ud}}} \end{aligned}$$

**(3) Tapizado:**

$$\begin{aligned} EP_{i3can} &= \text{Scan}_{i3} - (CP_i - CT_{1i} - CIS_i) * 0'68 - CDIS_{i3} - CL_{i3} - CS2_{i3} - CT_{3i3} = \\ &= \underline{\underline{-81'003 \text{ €/ud}}} \end{aligned}$$

**b) Reciclaje.**

**(1) Estructura.**

$$\begin{aligned} EP_{i\text{rec}} &= S\text{rec}_{i1} - (CP_i - CT_{1i} - CIS_i) * 0'04 - CDIS_{i1} - CL_{i1} - CS2_{i1} - CT_{3i1} = \\ &= \underline{\underline{-225'833 \text{ €/ud}}} \end{aligned}$$

**(2) Motor/mecanismos eléctricos**

$$\begin{aligned} EP_{i\text{rec}} &= S\text{rec}_{i2} - (CP_i - CT_{1i} - CIS_i) * 0'36 - CDIS_{i2} - CL_{i2} - CS2_{i2} - CT_{3i2} = \\ &= \underline{\underline{-232'213 \text{ €/ud}}} \end{aligned}$$

**(3) Tapizado:**

$$\begin{aligned} EP_{i\text{rec}} &= S\text{rec}_{i3} - (CP_i - CT_{1i} - CIS_i) * 0'68 - DIS_{i3} - CL_{i3} - CS2_{i3} - CT_{3i3} = \\ &= \underline{\underline{-131'833 \text{ €/ud}}} \end{aligned}$$

A continuación, se muestra una tabla resumen (Tabla 29) con los valores de rentabilidad económica de cada una de las alternativas de disposición:

<b>Valores de rentabilidad económica correspondiente a cada alternativa:</b>		
<b>EP<sub>REU<sub>i</sub></sub></b>	-38'30 €/ud	rentabilidad económica debido a la reintroducción en mercado primario del producto i
<b>EP<sub>OUT<sub>i</sub></sub></b>	-168'30 €/ud	rentabilidad económica debido a la reintroducción en mercado secundario del producto i
<b>EP<sub>REF<sub>i</sub></sub></b>	-103'30 €/ud	rentabilidad económica debido a la reintroducción del producto en el mercado primario tras el reacondicionamiento del producto i
<b>EP<sub>CAN<sub>i1</sub></sub></b>	-94'273 €/ud	rentabilidad económica debido a la canibalización del componente 1 estructura del producto i
<b>EP<sub>CAN<sub>i2</sub></sub></b>	-117'53 €/ud	rentabilidad económica debido a la canibalización del componente 2 motor del producto i
<b>EP<sub>CAN<sub>i3</sub></sub></b>	-81'003 €/ud	rentabilidad económica debido a la canibalización del componente 3 tapizado del producto i
<b>EP<sub>REC<sub>i1</sub></sub></b>	-225'83 €/ud	rentabilidad económica debido al reciclaje del componente 1 estructura del producto i
<b>EP<sub>REC<sub>i2</sub></sub></b>	-232'21 €/ud	rentabilidad económica debido al reciclaje del componente 2 motor del producto i
<b>EP<sub>REC<sub>i3</sub></sub></b>	-131'83 €/ud	rentabilidad económica debido al reciclaje del componente 3 tapizado del producto i

**Tabla 29.** Valores de rentabilidad económica correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia).

#### 14.2.3.2. *Valores ambientales*

Los valores ambientales, se obtienen utilizando el software libre Open LCA, tal y como se ha justificado en el capítulo 11. Para el presente ejemplo de aplicación, se ha utilizado la versión 1.8 en la opción de 64 bits, con fecha de lanzamiento en febrero de 2019.

La BBDD insertada en el programa para obtener los valores ambientales es la “ELCD 3.2 greendelta v2\_18” y los Datos correspondientes al método de impacto utilizado se obtienen a través de la BBDD “Ecoinvent 3.5 LCIA methods”.

Los valores ambientales obtenidos, se han conseguido a través de las valoraciones de impacto final total del método “ReCiPe Endpoint (H,A)”. Tal y como se justificó en el capítulo 8, el objetivo principal del método ReCiPe es proporcionar un método que combina el Eco-Indicador 99 y el método CML, en una versión actualizada, aportando niveles de indicadores de punto final que ofrecen un único valor total en base a las siguientes categorías: daños a la salud humana, daños a los ecosistemas y daños a la disponibilidad de recursos.

El método Recipe Endpoint HA, ofrece un valor total para la comparativa, más actualizado y consensuado que el Ecoindicador 99 y desde un enfoque jerárquico (versión H,A), ya que la perspectiva de tiempo que ofrece está equilibrada entre plazos largos y cortos de tiempo y cuenta con una inclusión de perspectivas basadas en el consenso. Además, la perspectiva jerárquica es la que se determina por defecto en el programa, por tanto, se entiende como la versión más consensuada.

#### Parámetros ambientales comunes a todas las alternativas:

**EIT<sub>ii</sub>** impacto ambiental del transporte del producto *i* desde el cliente hasta la empresa. Aunque la empresa en cuestión vende sobretodo en el territorio nacional, su principal cuota de mercado se distribuye entre la zona de Madrid, Catalunya y la Comunitat Valenciana. Por tanto, se considera como transporte medio en estos casos, la realización **de 300 km. Sobre dicha distancia, unos 50 km se realizan en camiones de pequeñas dimensiones (<3’5 t) y el resto con camiones de grandes dimensiones (17 t).** Esto es así, porque el camión pequeño se utiliza para desplazar el producto desde las instalaciones del cliente hasta la delegación más

cercana del transportista. Luego, la empresa de transporte utiliza camiones de grandes dimensiones para portes entre sus delegaciones y la última milla, entre el transportista y la empresa receptora del producto, se vuelve a realizar con camiones de poco tonelaje.

La simulación de dicho transporte en el programa, se realiza introduciendo como entrada, el transporte correspondiente a 250 km en un camión de 17'3 t máximo y 50 km en un camión de 3'5t, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 222):

Inputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Provider			
F <sub>E</sub> transport in t*km	Transport services/Other transport	45*250	kg*km	P Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER			
F <sub>E</sub> transport in t*km	Transport services/Other transport	45*50	kg*km	P Small lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 7,5 t total weight, 3,3 t max payload - RER			
Outputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod...	Provider
F <sub>E</sub> Sillon Relax		1.00000	Item(s)		none		

**Figura 222.** Entrada datos del parámetro ambiental EIT<sub>ii</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00296 pt/ud**, como se puede apreciar en la siguiente figura, extraída del apartado de árbol de contribuciones del análisis de resultados del proceso definido anteriormente. En este caso, se aprecia como el 0'00202 puntos (68'30 %) corresponde al impacto ambiental del transporte con el camión de gran tonelaje y 0'00094 puntos (31'70%) corresponde al camión de pequeñas dimensiones.

Contribution	Process	Amount	Unit
✓ 100.00%	P Sillon Relax	0.00296	points
> 68.30%	P Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	0.00202	points
> 31.70%	P Small lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 7,5 t total weight, 3,3 t max payload - RER	0.00094	points

**Figura 223.** Valores obtenidos del parámetro ambiental EIT<sub>ii</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado:

Aunque en este punto, el tipo de impacto ambiental es el mismo para las distintas alternativas que reintroducen el producto en el mercado, se considera un impacto ambiental diferente a la alternativa de reintroducción a través de un mercado secundario tipo outlet porque el cliente es diferente al de las demás alternativas y

las características del transporte hasta dicho cliente son diferentes. El cliente de outlet está situado, generalmente, a 100 km de distancia y suele transportar los productos en camiones propios de 3'5 t máximo.

En base a dichas características, se distinguirán dos aspectos de impacto ambiental diferentes:

**EIT<sub>2Ai</sub>** impacto ambiental del transporte del producto *i* desde la empresa hasta el nuevo cliente, en una reutilización del producto o venta tras el reacondicionamiento. En estos casos, tal y como se ha comentado anteriormente, existen tres grandes focos principales de clientes (Madrid, Catalunya y la Comunitat Valenciana) por lo que se plantea un transporte medio de 300 km, en las mismas condiciones que se plantea la recogida del producto, es decir, 250 km con un camión grande y 50km con un camión pequeño. Al ser las mismas condiciones que el apartado anterior, el impacto ambiental obtenido es de **0'00296 pt/ud.**

**EIT<sub>2Bi</sub>** impacto ambiental del transporte del producto *i* desde la empresa hasta el nuevo cliente, para un **producto tipo outlet**. En esta alternativa, se plantea un transporte medio de 100km en un camión pequeño de menos de 3'5t

Inputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Provider			
Fe transport in t*km	Transport services/Other trans...	45*100	kg*km	P Small lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 7,5 t total weight, 3,3 t max payload - RER			
Outputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod...	Provider
Fe Sillon Relax		1.00000	Item(s)		none		

Figura 224. Entrada datos del parámetro ambiental EIT<sub>2Bi</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00188 pt/ud.**

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P Sillon Relax	0.00188	points
> 100.00%	P Small lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 7,5 t total weight, 3,3 t max payload - RER	0.00188	points

Figura 225. Valores obtenidos del parámetro ambiental EIT<sub>2Bi</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:

$EIP_{1ij}$  impacto ambiental de desensamblaje del producto  $i$  en componentes  $j$ . Se considera 1 hora de trabajo manual, ayudado de pequeñas herramientas, con lo que se centra el impacto ambiental en el consumo de energía eléctrica. El consumo energético medio de este tipo de operaciones está cifrado en 1 KWh/día, lo que equivale a 125 Wh/h para una jornada de 8 horas, por tanto, el consumo energético de la operación de desensamblaje se cuantifica en 125 Wh/ud.

Inputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Provider		
Electricity	Energy carriers and technol...	125.00000	Wh	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES		
Outputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided pro...
Sillón Relax		1.00000	Item(s)		none	

Figura 226. Entrada datos del parámetro ambiental  $EIP_{1ij}$  en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00149 pt/ud.**

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Sillón Relax	0.00149	points
> 100.00%	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES	0.00149	points

Figura 227. Valores obtenidos del parámetro ambiental  $EIP_{1ij}$  en OpenLCA (Elaboración propia)

Este impacto ambiental se contempla para las alternativas de componentes, por tanto, se reparte su valor proporcionalmente entre los componentes en base al peso de cada uno de ellos sobre el producto final:

**Estructura (4%):  $EIP_{1i1} = 0'0000596$  pt/ud.**

**Motor/mecanismo (36%):  $EIP_{1i2} = 0'000536$  pt/ud.**

**Tapizado (60%):  $EIP_{1i3} = 0'000894$  pt/ud.**

$EIT_{3i1}$  impacto ambiental del transporte del componente  $I$  (*estructura*) del producto  $i$  desde la empresa hasta el centro de reciclaje. En esta alternativa se contempla el **transporte en un camión pequeño de menos de 3'5t durante 20 km. Asimismo, se mide el impacto ambiental en base al peso de la estructura (1'8 kg).**

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

Inputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Provider
Fe transport in t*km	Transport services/Other transport	1.8*20	kg*km	P Small lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 7,5 t total weight, 3,3 t max payload - RER

Outputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided ...	Provider	Data quali...	Descript...
Fe Sillón Relax		1.00000	Item(s)		none				

Figura 228. Entrada datos del parámetro ambiental EIT3i1 en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00001502 pt/ud.**

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P Sillón Relax	1.50261E-5	points
> 100.00%	P Small lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 7,5 t total weight, 3,3 t max payload - RER	1.50261E-5	points

Figura 229. Valores obtenidos del parámetro ambiental EIT3i1 en OpenLCA (Elaboración propia)

EIT3i2 impacto ambiental del transporte del componente 2 (*motor/mecanismos*) del producto *i* desde la empresa hasta el centro de reciclaje. En esta alternativa se contempla el **transporte en un camión pequeño de menos de 3'5t durante 69 km. Asimismo, se mide el impacto ambiental en base al peso del motor y los mecanismos eléctricos (16'2 kg).**

Inputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Provider
Fe transport in t*km	Transport services/Other transport	16.2*69	kg*km	P Small lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 7,5 t total weight, 3,3 t max payload - RER

Outputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided pro...	Provider	Data	
Fe Sillón Relax		1.00000	Item(s)		none				

Figura 230. Entrada datos del parámetro ambiental EIT3i2 en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00047 pt/ud.**

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P Sillón Relax	0.00047	points
> 100.00%	P Small lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 7,5 t total weight, 3,3 t max payload - RER	0.00047	points

Figura 231. Valores obtenidos del parámetro ambiental EIT3i2 en OpenLCA (Elaboración propia)

EIT3i3 impacto ambiental del transporte del componente 3 (*tapizado*) del producto *i* desde la empresa hasta el centro de reciclaje. En esta alternativa

se contempla el **transporte en un camión pequeño de menos de 3'5t durante 85 km. Asimismo, se mide el impacto ambiental en base al peso del tapizado (27 kg).**

Inputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Provider			
F <sub>2</sub> transport in t*km	Transport services/Other transport	27*85	kg*km	P Small lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 7,5 t total weight, 3,3 t max payload - RER			
Outputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided pro...	Provider
F <sub>2</sub> Sillón Relax		1.00000	Item(s)		none		

**Figura 232.** Entrada datos del parámetro ambiental EIT<sub>313</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00096 pt/ud.**

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P Sillón Relax	0.00096	points
> 100.00%	P Small lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 7,5 t total weight, 3,3 t max payload - RER	0.00096	points

**Figura 233.** Valores obtenidos del parámetro ambiental EIT<sub>313</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

Parámetros ambientales específicos a cada alternativa de disposición:

**EIP<sub>2i</sub>** impacto ambiental del **reacondicionamiento** del producto *i*. Las tareas de reacondicionamiento están cifradas en una duración de 20 minutos (0'333 h). Por tanto, si el consumo energético medio de este tipo de operaciones está cifrado en 1 KWh/día, lo que equivale a 125 Wh/h contando que se trabajan 8 horas al día, el consumo eléctrico de las operaciones de reacondicionamiento se cifra en 41'63 Wh/ud.

Inputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Provider			
F <sub>2</sub> Electricity	Energy carriers and technologies/Electricity	41.63000	Wh	P Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES			
Outputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided pro...	Provider
F <sub>2</sub> Sillón Relax		1.00000	Item(s)		none		

**Figura 234.** Entrada datos del parámetro ambiental EIP<sub>2i</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00050 pt/ud.**



Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P Sillón Relax	0.00050	points
> 100.00%	P Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES	0.00050	points

Figura 235. Valores obtenidos del parámetro ambiental EIP<sub>2i</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

**EIR<sub>i1</sub>** impacto ambiental de **reciclaje del componente 1** (*estructura*) del producto *i*. El impacto ambiental del reciclaje vendrá dado fundamentalmente por el consumo eléctrico de las operaciones mecánicas realizadas sobre el componente para su reciclaje. En este sentido, si el consumo energético medio de este tipo de operaciones está cifrado en 1 KWh/día, lo que equivale a 125 Wh/h contando que se trabajan 8 horas al día, el consumo eléctrico de las operaciones de reciclaje de la estructura, considerando que se tardan 5 minutos aproximadamente, se cifra en 10'417 Wh/ud.

Inputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Provider		
Electricity	Energy carriers and technol...	10.41700	Wh	P Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES		
Outputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided pro...
Sillón Relax		1.00000	Item(s)		none	

Figura 236. Entrada datos del parámetro ambiental EIR<sub>i1</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00012 pt/ud.**

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P Sillón Relax	0.00012	points
> 100.00%	P Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES	0.00012	points

Figura 237. Valores obtenidos del parámetro ambiental EIR<sub>i1</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

**EIR<sub>i2</sub>** impacto ambiental de **reciclaje del componente 2** (*motor/mecanismos*) del producto *i*. El impacto ambiental del reciclaje vendrá dado fundamentalmente por el consumo eléctrico de las operaciones mecánicas realizadas sobre el componente para su reciclaje. En este sentido, si el consumo energético medio de este tipo de operaciones está cifrado en 1 KWh/día, lo que equivale a 125 Wh/h contando que se trabajan 8 horas al día, el consumo eléctrico de las operaciones de reciclaje del motor y mecanismos eléctricos, considerando que se tardan 5 minutos aproximadamente, se cifra en 10'417 Wh/ud.

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

Inputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Provider		
Electricity	Energy carriers and technol...	10.41700	Wh	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES		
Outputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided pro...
Sillón Relax		1.00000	Item(s)		none	

Figura 238. Entrada datos del parámetro ambiental EIR<sub>i2</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00012 pt/ud.**

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Sillón Relax	0.00012	points
> 100.00%	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES	0.00012	points

Figura 239. Valores obtenidos del parámetro ambiental EIR<sub>i2</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

**EIR<sub>i3</sub>** impacto ambiental de **reciclaje del componente 3** (*tapizado*) del producto *i*. Igual que en casos anteriores, el impacto ambiental del reciclaje vendrá dado fundamentalmente por el consumo eléctrico de las operaciones mecánicas realizadas sobre el componente para su reciclaje. En este sentido, si el consumo energético medio de este tipo de operaciones está cifrado en 1 KWh/día, lo que equivale a 125 Wh/h contando que se trabajan 8 horas al día, el consumo eléctrico de las operaciones de reciclaje del tapizado, considerando que se tardan 5 minutos aproximadamente, se cifra en 10'417 Wh/ud.

Inputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Provider		
Electricity	Energy carriers and technol...	10.41700	Wh	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES		
Outputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided pro...
Sillón Relax		1.00000	Item(s)		none	

Figura 240. Entrada datos del parámetro ambiental EIR<sub>i3</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00012 pt/ud.**

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Sillón Relax	0.00012	points
> 100.00%	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES	0.00012	points

Figura 241. Valores obtenidos del parámetro ambiental EIR<sub>i3</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

A continuación, se muestra una tabla resumen (Tabla 30) donde se indican los valores referentes a los parámetros ambientales aplicables al ejemplo de aplicación. Los parámetros son coloreados según el ámbito de aplicación (verde – parámetros comunes según finalidad, marrón – parámetros comunes para todas las alternativas y azul – parámetros específicos para cada alternativa):

PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
<b>EIT<sub>1i</sub></b>	0'00296 pt/ud	impacto ambiental del transporte del producto <i>i</i> desde el cliente hasta la empresa
PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>EIT<sub>2Ai</sub></b>	0'00296 pt/ud	impacto ambiental del transporte del producto <i>i</i> desde la empresa hasta el nuevo cliente de mercado primario
<b>EIT<sub>2Bi</sub></b>	0'00188 pt/ud	impacto ambiental del transporte del producto <i>i</i> desde la empresa hasta el nuevo cliente de mercado secundario tipo outlet
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>EIP<sub>1i1</sub></b>	0'0000596 pt/ud	Impacto ambiental del desmontaje del componente 1 ( <i>estructura</i> ) del producto <i>i</i>
<b>EIP<sub>1i2</sub></b>	0'000536 pt/ud	Impacto ambiental del desmontaje del componente 2 ( <i>motor</i> ) del producto <i>i</i>
<b>EIP<sub>1i3</sub></b>	0'000894 pt/ud	Impacto ambiental del desmontaje del componente 3 ( <i>tapizado</i> ) del producto <i>i</i>
<b>EIT<sub>3i1</sub></b>	0'00001502 pt/ud	impacto ambiental del transporte del componente 1 ( <i>estructura</i> ) del producto <i>i</i> desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje
<b>EIT<sub>3i2</sub></b>	0'00047 pt/ud	impacto ambiental del transporte del componente 2 ( <i>motor</i> ) del producto <i>i</i> desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje
<b>EIT<sub>3i3</sub></b>	0'00096 pt/ud	impacto ambiental del transporte del componente 3 ( <i>tapizado</i> ) del producto <i>i</i> desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje

PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
<b>EIP<sub>2i</sub></b>	0'00050 pt/ud	impacto ambiental de reacondicionamiento del producto <i>i</i>
<b>EIR<sub>i1</sub></b>	0'00012 pt/ud	impacto ambiental de reciclaje del componente 1 ( <i>estructura</i> ) del producto <i>i</i>
<b>EIR<sub>i2</sub></b>	0'00012 pt/ud	impacto ambiental de reciclaje del componente 2 ( <i>motor</i> ) del producto <i>i</i>
<b>EIR<sub>i3</sub></b>	0'00012 pt/ud	impacto ambiental de reciclaje del componente 3 ( <i>tapizado</i> ) del producto <i>i</i>

Tabla 30. Valores ambientales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

**Valores de Impacto Ambiental para cada Alternativa.**

El valor de impacto ambiental para cada alternativa de disposición se obtiene tras la agregación de los valores de los distintos parámetros referentes a cada una de ellas, tal y como se ha expuesto en el apartado 9.3. Para facilitar el entendimiento de los valores de impacto ambiental de cada alternativa, se expone en la figura siguiente (Figura 242) el desglose de aspectos que componen el impacto ambiental de las alternativas de LI:



Figura 242. Estructura de aspectos que componen el impacto ambiental de las alternativas de LI (Elaboración propia).

A continuación, se mostrará los parámetros ambientales que hacen referencia a cada alternativa y sus valores correspondientes, obteniendo el valor de impacto ambiental de cada alternativa. Asimismo, se acompaña en cada alternativa una miniatura de la imagen anterior, destacando los parámetros aplicables a la alternativa en cuestión:

**1. Alternativas de reintroducción en el mercado:**

o **Reutilización en el mercado primario como nuevo.**

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	ASPECTOS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	+ ASPECTOS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD	+ ASPECTOS AMBIENTALES ESPECÍFICOS
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	Reutilización/reventa	Transporte desde el usuario hasta el centro de recolección	Transporte hasta el punto de tratamiento y hasta el cliente	-----
	Reparación			
	Reacondicionamiento			
	Remanufacturación			

Dado que en esta alternativa de disposición no se interviene sobre el producto, el impacto ambiental de la alternativa de reutilización directa vendrá dado por el impacto ambiental correspondiente

al transporte desde el cliente hasta la empresa ( $EIT_{1i} = 0'00296 \text{ pt/ud}$ ) y desde la empresa hasta el nuevo cliente ( $EIT_{2Ai} = 0'00296 \text{ pt/ud}$ ).

**$EI_{REUi} = EIT_{1i} + EIT_{2Ai} = 0'0059 \text{ pt/ud}$**

o **Reutilización en el mercado secundario/outlet.**

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	ASPECTOS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	+ ASPECTOS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD	+ ASPECTOS AMBIENTALES ESPECÍFICOS
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	Reutilización/reventa	Transporte desde el usuario hasta el centro de recolección	Transporte hasta el punto de tratamiento y hasta el cliente	-----
	Reparación			
	Reacondicionamiento			
	Remanufacturación			

El impacto ambiental correspondiente a la alternativa de reintroducción en el mercado a través del mercado secundario tipo outlet también está compuesto principalmente por el transporte desde el

cliente hasta la empresa ( $EIT_{1i} = 0'00296 \text{ pt/ud}$ ) y desde la empresa hasta el nuevo cliente ( $EIT_{2Bi} = 0'00188 \text{ pt/ud}$ ), siendo este último sensiblemente diferente al caso anterior por la peculiaridad del mercado al que se dirige.

**$EI_{OUTi} = EIT_{1i} + EIT_{2Bi} = 0'0048 \text{ pt/ud}$**

o **Reacondicionamiento.**

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	ASPECTOS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	ASPECTOS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD	ASPECTOS AMBIENTALES ESPECÍFICOS
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	Reutilización/reventa	Transporte desde el usuario hasta el centro de recolección	Transporte hasta el punto de tratamiento y hasta el cliente	
	Reparación			
	Reacondicionamiento			Producción
	Remanufacturación			

El impacto ambiental correspondiente a la alternativa de reacondicionamiento se obtiene al agregar el impacto ambiental del transporte correspondiente entre el cliente y la empresa ( $EIT_{1i} = 0'00296$  pt/ud), más el impacto del transporte entre la empresa y el nuevo cliente ( $EIT_{2Ai} = 0'00296$  pt/ud) y el valor del impacto ambiental del proceso de reacondicionamiento ( $EIP_{2i} = 0'00050$  pt/ud).

$$E_{Iref} = EIT_{1i} + EIT_{2Ai} + EIP_{2i} = 0'0064 \text{ pt/ud.}$$

2. Aprovechamiento de Componentes.

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	ASPECTOS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	ASPECTOS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD	ASPECTOS AMBIENTALES ESPECÍFICOS
APROVECHAMIENTO DE COMPONENTES		Transporte desde el usuario hasta el centro de recolección	Transporte hasta el punto de tratamiento	
	Canibalización			Producción
	Reciclaje			Producción

El primer parámetro ambiental a tener en cuenta para cuantificar el impacto ambiental de las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes es el del transporte correspondiente entre el cliente y la empresa ( $EIT_{1i} = 0'00296$  pt/ud), común a todas las alternativas. Debido a que este parámetro se obtiene por unidad de producto y debe estar presente en su totalidad en cualquier combinación de alternativas, **distribuidos en función de la proporción de cada componente sobre el producto.**

El segundo parámetro ambiental a tener en cuenta, común a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, es el desensamblaje del producto. Este parámetro se **distribuye proporcionalmente entre los componentes en función del porcentaje del peso del componente** ( $EIP_{1i1} = 0'0000596$  pt/ud,  $EIP_{1i2} = 0'000536$  pt/ud y  $EIP_{1i3} = 0'000894$  pt/ud).

A parte de los impactos ambientales dados por aspectos comunes, para calcular el valor del impacto ambiental correspondiente a cada alternativa, se contempla el impacto ambiental específico de cada una de ellas. Respecto a la canibalización, el impacto ambiental específico es considerado nulo en el presente ejemplo de aplicación debido a que las operaciones de canibalización son consideradas como operaciones de fabricación de nuevos productos.

Aunque las operaciones de reciclaje son realizadas por empresas externas, se considera el impacto ambiental de la finalidad como reciclaje de cada componente ( $EIR_{i1} = 0'00012 \text{ pt/ud}$ ,  $EIR_{i2} = 0'00012 \text{ pt/ud}$ , y  $EIR_{i3} = 0'00012 \text{ pt/ud}$ ) y el transporte de cada uno de ellos desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje ( $EIT_{3i1} = 0'00001502 \text{ pt/ud}$ ,  $EIT_{3i2} = 0'00012 \text{ pt/ud}$ , y  $EIT_{3i3} = 0'00012 \text{ pt/ud}$ ).

De este modo, los valores de impacto ambiental, desglosados por alternativa y componente, quedarían de la siguiente manera:

**a) Canibalización.**

**(1) Estructura.**

$$\underline{EI_{i1can} = (EIT_{1i} * 0'04) + EIP_{1i1} + EIP_{3i1} = 0'0010 \text{ pt/ud.}}$$

**(2) Motor/mecanismos eléctricos**

$$\underline{EI_{i2can} = (EIT_{1i} * 0'36) + EIP_{1i2} + EIP_{3i2} = 0'0015 \text{ pt/ud.}}$$

**(3) Tapizado:**

$$\underline{EI_{i3can} = (EIT_{1i} * 0'68) + EIP_{1i3} + EIP_{3i3} = 0'0019 \text{ pt/ud.}}$$

**b) Reciclaje.**

**(1) Estructura.**

$$\underline{EI_{i1rec} = (EIT_{1i} * 0'04) + EIP_{1i1} + EIT_{3i1} + EIR_{i1} = 0'0012 \text{ pt/ud.}}$$

**(2) Motor/mecanismos eléctricos**

$$\underline{EI_{i2rec} = (EIT_{1i} * 0'36) + EIP_{1i2} + EIT_{3i2} + EIR_{i2} = 0'0021 \text{ pt/ud.}}$$

**(3) Tapizado:**

$$\underline{EI_{i3rec} = (EIT_{1i} * 0'68) + EIP_{1i3} + EIT_{3i3} + EIR_{i3} = 0'003 \text{ pt/ud.}}$$

A continuación, se muestra una tabla resumen (Tabla 31) con los valores de impacto ambiental de cada una de las alternativas de disposición:

<b>Valores de impacto ambiental correspondiente a cada alternativa:</b>		
<b>EIREU<sub>i</sub></b>	0'0059 pt/ud	impacto ambiental debido a la reventa en mercado primario del producto i
<b>EIOUT<sub>i</sub></b>	0'0048 pt/ud	impacto ambiental debido a la reventa en mercado secundario del producto i
<b>EIREFI</b>	0'0064 pt/ud	impacto ambiental debido al reacondicionamiento del producto i
<b>EICANI<sub>1</sub></b>	0'0010 pt/ud	impacto ambiental debido a la canibalización del componente 1 estructura del producto i
<b>EICANI<sub>2</sub></b>	0'0015 pt/ud	impacto ambiental debido a la canibalización del componente 2 motor del producto i
<b>EICANI<sub>3</sub></b>	0'0019 pt/ud	impacto ambiental debido a la canibalización del componente 3 tapizado del producto i
<b>EIREC<sub>1</sub></b>	0'0012 pt/ud	impacto ambiental debido al reciclaje del componente 1 estructura del producto i
<b>EIREC<sub>2</sub></b>	0'0021 pt/ud	impacto ambiental debido al reciclaje del componente 2 motor del producto i
<b>EIREC<sub>3</sub></b>	0'0030 pt/ud	impacto ambiental debido al reciclaje del componente 3 tapizado del producto i

**Tabla 31.** Valores de impacto ambiental correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia).

**14.2.3.3. Valores sociales**

Los parámetros sociales están compuestos por las horas de MO necesarias para cada alternativa, categorizadas en base al factor regional de la zona geográfica donde se llevan a cabo las operaciones necesarias para cada una de las distintas alternativas.

Para poder calcular los valores de impacto social de cada alternativa, se van a calcular primero los valores de tiempo de MO referente a cada alternativa y luego el factor regional de cada zona de intervención.



### **Valores de Mano de Obra.**

El cálculo de los valores de MO correspondiente a cada alternativa corresponde al sumatorio de tiempo de las operaciones necesarias para ejecutar cada alternativa. Siguiendo la misma estructura que los valores económicos y ambientales, se calcula primero los que son comunes a todas las alternativas, luego los que son comunes a las alternativas según su finalidad y, por último, aquellos que son específicos de cada alternativa, obteniendo finalmente el valor de cada alternativa:

- **Horas de MO comunes a todas las alternativas.**

Todos los productos son traídos de vuelta a la empresa para revisarlos y designarles una alternativa de disposición, por ello, la cuantía de las horas de trabajo por unidad recuperada o devuelta realizadas por dicha empresa desde que se recupera el producto hasta que se determina la disposición a aplicar, se consideran comunes a todas las alternativas y viene designado por el parámetro  $W_{ii}$ .

El tiempo de transporte desde el cliente hasta la empresa se cifra en 5 horas, de manera que repartiendo el tiempo entre la carga que se suele transportar, cifrada en 4 unidades, se obtiene un tiempo medio de 1'25 h/ud. En este sentido, el tiempo destinado a la descarga del camión, transporte hasta el interior de la planta y posterior inspección visual para determinación de disposición, se contabiliza una media de 10 minutos (0'167 h/ud.). Por tanto, el tiempo destinado a las operaciones de recogida del producto y DD es de  $W_{ii} = 1'417 h/ud.$

- **Horas de MO comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado.**

Todas las alternativas que tienen la finalidad de reintroducción en el mercado cuentan con las tareas de puesta a punto del producto para la venta. Dichas tareas engloban las acciones de embalaje, etiquetado y almacenaje previo al transporte hasta el nuevo cliente, destinando una media de 10 minutos (0'167 h/ud.) de mano de obra directa.

El tiempo de transporte desde la empresa hasta el cliente se cifra en 5 horas, de manera que repartiendo el tiempo entre la carga que se suele transportar, cifrada en 4 unidades, se obtiene un tiempo medio de 1'25 h/ud. Por tanto, el tiempo

destinado a las operaciones de reintroducción del producto en el mercado primario es de  **$W_{2Ai} = 1'417 \text{ h/ud.}$**

Comparando el tipo de cliente habitual, el cual se encuentra principalmente en la zona de Barcelona, Madrid y Comunitat Valenciana, según la información expuesta anteriormente, el tipo de cliente al que se le envía el producto outlet es diferente, puesto que suele concentrarse mayoritariamente en la Comunitat Valenciana. Para este tipo de servicio el tiempo de transporte se cifra en 1'5 horas y el número de unidades medio a transportar es de 2 unidades. De esta forma, se obtiene un tiempo medio de  **$0'75 \text{ h/ud.}$**  Por tanto, el tiempo destinado a las operaciones de reintroducción del producto en el mercado secundario outlet es de  **$W_{2Bi} = 0'917 \text{ h/ud.}$**

- **Horas de MO comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes.**

Todas las alternativas que tienen la finalidad de aprovechamiento de componentes tienen la etapa en común en la que el producto es desmontado por completo para separar sus componentes. Dicha etapa está cifrada en una duración aproximada de  **$1 \text{ h/ud.}$**  El tiempo de desmontaje de cada producto, se reparte entre los componentes según la proporción de los componentes sobre el producto final, quedando de la siguiente manera:

$$\text{Estructura}_1 = 1 * 0'04 = 0'040 \text{ h/ud}$$

$$\text{Motor}_2 = 1 * 0'36 = 0'360 \text{ h/ud}$$

$$\text{Tapizado}_3 = 1 * 0'60 = 0'600 \text{ h/ud}$$

Una vez el producto es desmontado, sus componentes son transportados a un punto de la empresa donde son introducidos en la cadena de fabricación (alternativa de canibalización) o recogidos por empresas externas para ser reciclados (alternativa de reciclaje). Ambos transportes están cifrados en 5 minutos por cada componente ( **$0'0833 \text{ h/ud.}$** ). Por tanto, el tiempo destinado a las operaciones de desensamblaje y transporte de cada componente al punto de tratamiento es de:

$$\text{W}_{4i1} = (0'04 + 0'0833) = 0'1233 \text{ h/ud.}$$

$$\underline{W_{412} = (0'36 + 0'0833) = 0'4433 \text{ h/ud.}}$$

$$\underline{W_{413} = (0'60 + 0'0833) = 0'6833 \text{ h/ud.}}$$

- **Horas de MO específicas a la alternativa de reacondicionamiento.**

Por norma general, la intervención sobre el producto para su reacondicionamiento no suele ser muy prolongada, ya que se suele identificar el componente que no se encuentra en perfecto estado y se sustituye por uno que si lo está. Dicha operación, se cuantifica en una media de 20 minutos y viene designada por el parámetro  $W_{refi}$ . ( $W_{refi} = 0'333 \text{ h/ud}$ ).

- **Horas de MO específicas a la alternativa de reciclaje de componentes.**

El tiempo específico correspondiente al reciclaje de componentes, se centra en el tiempo destinado al transporte desde la empresa hasta el centro de tratamiento más el tiempo destinado al reciclaje de cada componente del producto y viene designada por el parámetro  $W_{recij}$ .

**Horas de MO destinadas al reciclaje de la estructura.**

Contando como acciones específicas para el reciclaje de la estructura, la recogida de la misma, el transporte desde la planta hasta la planta de reciclaje y la posterior disposición, se cuantifica la MO en un total de 35 minutos ( $W_{rec11} = 0'5833 \text{ h/ud}$ ), ya que se dirige a una zona cercana dentro de la misma provincia de Valencia.

**Horas de MO destinadas al reciclaje del motor y mecanismos eléctricos.**

Contando como acciones específicas para el reciclaje de los motores y los mecanismos eléctricos, la recogida de estos, el transporte desde la empresa hasta la planta de reciclaje y la posterior disposición, se cuantifica la MO en un total de 48 minutos ( $W_{rec12} = 0'8 \text{ h/ud}$ ), ya que se dirigen a la provincia de Castellón

**Horas de MO destinadas al reciclaje del tapizado.**

Contando como acciones específicas para el reciclaje del tapizado, la recogida de este, el transporte desde la empresa hasta la planta de reciclaje y la posterior

disposición, se cuantifica la MO en un total de **1 h/ud**, ya que se dirige a la zona de Alcoy (Alicante) ( **$W_{rec3} = 1 \text{ h/ud}$** ).

**Valores de factor regional para cada Alternativa.**

El valor del impacto social correspondiente a cada alternativa se obtiene tras multiplicar las horas de MO necesarias por un factor regional de la zona donde se lleva a cabo el trabajo. En este sentido, se ha marcado como factor regional la tasa de desempleo de la provincia donde se ejecuta la operación, respecto a la tasa de desempleo nacional.

Todas las operaciones que realiza la empresa objeto de estudio se realizan en la provincia de Valencia, a excepción de las operaciones de reciclaje del motor y mecanismos eléctricos, que se realiza en la provincia de Castellón, y las operaciones de reciclaje del tapizado y venta del producto outlet, que se realiza en la provincia de Alicante.

Según las provincias donde se realizan las distintas operaciones y los valores de la tasa de desempleo, correspondientes al segundo trimestre de 2019, el factor regional de cada zona queda recogido en la tabla siguiente:

	Tasa de desempleo 2T - 2019	Factor regional ( $\mu_i$ )
<b>Valor Nacional</b>	14'02	1'00
<b>Valencia (Provincia)</b>	14'00	0'99
<b>Castellón (Provincia)</b>	14'25	1'01
<b>Alicante (Provincia)</b>	14'71	1'05
<b>Comunitat Valenciana</b>	14'30	1'02

**Tabla 32.** Tasa de desempleo y factor regional según las provincias donde se realizan operaciones (Elaboración propia).

A continuación, se muestra una tabla resumen (Tabla 33) donde se indican los valores referentes a los parámetros sociales aplicables al ejemplo de aplicación. Los parámetros son coloreados según el ámbito de aplicación (verde – parámetros comunes según finalidad, marrón – parámetros comunes para todas las alternativas y azul – parámetros específicos para cada alternativa):

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

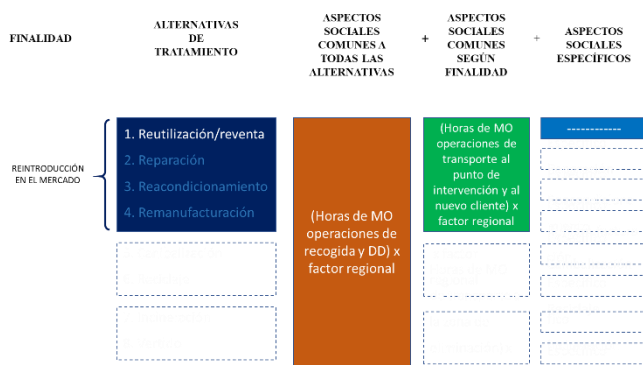
PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
$W_{1i} * \mu_{1i}$	1'417*0'99	Horas de MO de las operaciones de recogida del producto i y DD * factor regional correspondiente
PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$W_{2Ai} * \mu_{2Ai}$	1'417*0'99	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado primario * factor regional correspondiente
$W_{2Bi} * \mu_{2Bi}$	0'917 *1'02	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado secundario outlet * factor regional correspondiente
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
$W_{4i1} * \mu_{4i1}$	(0'04+0'0833)*0'99	Horas de MO de las operaciones de desensamblaje y transporte del componente 1 del producto i al punto de tratamiento * factor regional correspondiente
$W_{4i2} * \mu_{4i2}$	(0'36+0'0833)*0'99	Horas de MO de las operaciones de desensamblaje y transporte del componente 2 del producto i al punto de tratamiento * factor regional correspondiente
$W_{4i3} * \mu_{4i3}$	(0'60+0'0833)*0'99	Horas de MO de las operaciones de desensamblaje y transporte del componente 3 del producto i al punto de tratamiento * factor regional correspondiente
PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
$W_{ref_i} * \mu_{ref_i}$	0'333*0'99	Horas de MO de las operaciones de Reacondicionamiento del producto i * factor regional correspondiente
$W_{rec_{i1}} * \mu_{rec_{i1}}$	0'5833*0'99	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 1 del producto i * factor regional correspondiente
$W_{rec_{i2}} * \mu_{rec_{i2}}$	0'80*1'01	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 2 del producto i * factor regional correspondiente
$W_{rec_{i3}} * \mu_{rec_{i3}}$	1*1'05	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 3 del producto i * factor regional correspondiente

Tabla 33. Valores sociales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

A continuación, se mostrará los parámetros sociales que hacen referencia a cada alternativa y sus valores correspondientes, obteniendo el valor de impacto social de cada alternativa. Asimismo, se acompaña en cada alternativa una miniatura de la imagen anterior, destacando los parámetros aplicables a la alternativa en cuestión:

**1. Alternativas de reintroducción en el mercado:**

o **Reutilización en el mercado primario como nuevo.**



Las horas de MO correspondientes a la reutilización, incluyen las horas comunes de todas las alternativas para realizar el transporte del cliente a la empresa más la recepción y selección de disposición junto con las horas destinadas a las operaciones de

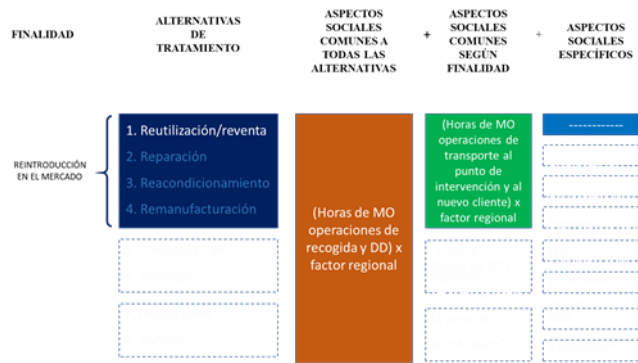
reintroducción de producto en el mercado, como son la puesta a punto del producto más su transporte desde la empresa al cliente nuevo ( $w_{reu} = 1'25 + 0'167 + 0'167 + 1'25 = 2'834 \text{ h/ud}$ ).

Aunque el transporte no se realiza íntegramente en la provincia de Valencia, se considera la provincia de origen de la empresa donde repercute las horas de MO creadas en el transporte. De esta forma, se contemplan todas las operaciones en la provincia de Valencia y, en consecuencia, el factor de ponderación regional ( $\mu_{reu} = 0'99$ ) adecua las horas de mano de obra a la provincia donde se llevan a cabo. Por tanto, el valor del impacto social debido a la reutilización será de:

$$SI_{reui} = W_{1i} * \mu_{1i} + W_{2Ai} * \mu_{2Ai} = 2'806.$$

o **Reutilización en el mercado secundario/outlet.**

Las horas de MO de la alternativa de reintroducción en el mercado a través de outlet, coinciden con las del apartado anterior, por tratarse de una alternativa con las mismas operaciones, en cuanto al procedimiento de recepción, selección de disposición y posteriores acciones de puesta a punto para reintroducirlo en el mercado. El único cambio con respecto al caso anterior corresponde al transporte de distribución del producto outlet, tal y como se ha expuesto anteriormente.

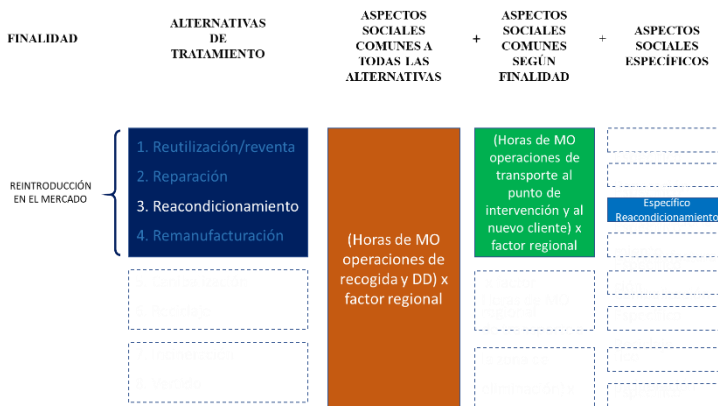


Las operaciones de entrega del producto son ejecutadas en la comunidad Valenciana, por tanto, se toma como referencia la tasa de paro general de la comunidad ( $\mu_{out}=1'02$ ), generando un valor de impacto social,

debido a la reutilización tipo outlet, por importe de:

$$SI_{outi} = W_{1i} * \mu_{1i} + W_{2Bi} * \mu_{2Bi} = 2'806.$$

o **Reacondicionamiento.**



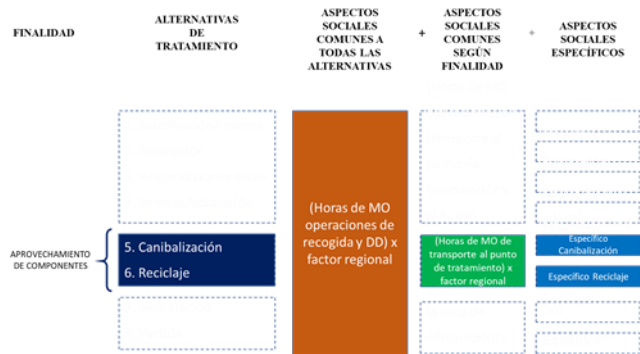
Las horas de MO destinadas a la alternativa de reacondicionamiento engloban las horas creadas en la alternativa anterior de reutilización/reventa con respecto a la

reintroducción del producto en el mercado (**2'834 h/ud**) más el tiempo destinado al reacondicionamiento del producto. Según información facilitada por la propia empresa, se destinan alrededor de unos 20 minutos por unidad (**0'333 h/ud**) para el reacondicionamiento del sillón, teniendo en cuenta el transporte, la manipulación y la intervención (**w<sub>ref</sub> = 2'834 + 0'333 = 3'167 h/ud**).

Las operaciones son ejecutadas en la provincia de Valencia ( $\mu_{out}=0'99$ ), por tanto, el valor del impacto social debido al reacondicionamiento del producto será de:

$$SI_{refi} = W_{1i} * \mu_{1i} + W_{2Ai} * \mu_{2Ai} + W_{refi} * \mu_{refi} = 3'135.$$

## 2. Aprovechamiento de Componentes.



El primer parámetro social a tener en cuenta para cuantificar el impacto social de las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes es el de las operaciones de recogida y

DD correspondiente entre el cliente y la empresa ( $W_{li} * \mu_{li} = 1'40283$ ), común a todas las alternativas. Debido a que este parámetro se obtiene por unidad de producto y debe estar presente en su totalidad en cualquier combinación de alternativas, se distribuye proporcionalmente entre los componentes en función del porcentaje del peso del componente.

El segundo parámetro social a tener en cuenta, común a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, es el correspondiente a las operaciones de desensamblaje y transporte del componente al punto de recogida ( $W_{4ij} * \mu_{4ij}$ ).

A parte de los impactos sociales dados por aspectos comunes, para calcular el valor del impacto social correspondiente a cada alternativa, se contempla el impacto específico de cada una de ellas. Respecto a la canibalización, el impacto social específico es considerado nulo en el presente caso de estudio debido a que las operaciones de canibalización son consideradas como operaciones de fabricación de nuevos productos.

Aunque las operaciones de reciclaje son realizadas por empresas externas, se considera el impacto social de la finalidad como reciclaje de cada componente con el correspondiente transporte de cada uno de ellos desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje ( $W_{recij} * \mu_{recij}$ ).

De este modo, los valores de impacto ambiental, desglosados por alternativa y componente, quedarían de la siguiente manera:



**a) Canibalización.**

**(1) Estructura.**

$$\underline{SI_{can\ i1} = W_{1i} * \mu_{1i} * 0'04 + W_{4i1} * \mu_{4i1} = 0'177.}$$

**(2) Motor/mecanismos eléctricos**

$$\underline{SI_{can\ i2} = W_{1i} * \mu_{1i} * 0'36 + W_{4i2} * \mu_{4i2} = 0'943.}$$

**(3) Tapizado:**

$$\underline{SI_{can\ i3} = W_{1i} * \mu_{1i} * 0'60 + W_{4i3} * \mu_{4i3} = 1'518.}$$

**b) Reciclaje.**

**(1) Estructura.**

$$\underline{SI_{reci1} = W_{1i} * \mu_{1i} * 0'04 + W_{4i1} * \mu_{4i1} + W_{reci1} * \mu_{reci1} = 0'755.}$$

**(2) Motor/mecanismos eléctricos**

$$\underline{SI_{reci2} = W_{1i} * \mu_{1i} * 0'36 + W_{4i2} * \mu_{4i2} + W_{reci2} * \mu_{reci2} = 1'753.}$$

**(3) Tapizado:**

$$\underline{SI_{reci3} = W_{1i} * \mu_{1i} * 0'60 + W_{4i3} * \mu_{4i3} + W_{reci3} * \mu_{reci3} = 2'573.}$$

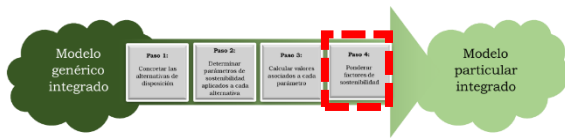
A continuación, se muestra una tabla resumen (Tabla 34) con los valores de impacto social de cada una de las alternativas de disposición:

<b>Valores de impacto social correspondiente a cada alternativa:</b>		
<b>SI<sub>REU<sub>i</sub></sub></b>	2'806	impacto social debido a la reventa en mercado primario del producto <i>i</i>
<b>SI<sub>OUT<sub>i</sub></sub></b>	2'381	impacto social debido a la reventa en mercado secundario del producto <i>i</i>
<b>SI<sub>REF<sub>i</sub></sub></b>	3'135.	impacto social debido al reacondicionamiento del producto <i>i</i>
<b>SI<sub>CAN<sub>i1</sub></sub></b>	0'177	impacto social debido a la canibalización del componente <i>1 estructura</i> del producto <i>i</i>
<b>SI<sub>CAN<sub>i2</sub></sub></b>	0'943	impacto social debido a la canibalización del componente <i>2 motor</i> del producto <i>i</i>
<b>SI<sub>CAN<sub>i3</sub></sub></b>	1'518	impacto social debido a la canibalización del componente <i>3 tapizado</i> del producto <i>i</i>

<b>SI<sub>RECi1</sub></b>	0'755	impacto social debido al reciclaje del componente <i>1 estructura</i> del producto <i>i</i>
<b>SI<sub>RECi2</sub></b>	1'753	impacto social debido al reciclaje del componente <i>2 motor</i> del producto <i>i</i>
<b>SI<sub>RECi3</sub></b>	2'573	impacto social debido al reciclaje del componente <i>3 tapizado</i> del producto <i>i</i>

**Tabla 34.** Valores de impacto social correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia).

#### 14.2.4. Paso 4. Ponderar los factores de sostenibilidad



El último paso de la metodología de adaptación del modelo integrado genérico a cada caso particular consiste en la ponderación

de los tres factores de sostenibilidad: económico, ambiental y social. En este sentido, mediante la ponderación, se asigna la importancia que el propio decisor concede a dichos factores.

En este ejemplo de aplicación, la ponderación de los factores de sostenibilidad se obtuvo mediante una entrevista con el gerente de la empresa de sillones de relax, el cual nos trasladó la política de sostenibilidad que seguía la compañía en sus decisiones.

Si bien la empresa tomó sus decisiones, en los años anteriores, en base a criterios económicos, casi exclusivamente, el gerente reconoce que ahora quieren que los criterios ambiental y social tengan más peso en sus decisiones. Por ello, el escenario de ponderación de factores con el que se va a trabajar en el presente ejemplo de aplicación es el siguiente:

**Ponderación de factores:** 60% económicos, 30% ambientales y 10 % sociales.

#### 14.2.5. Obtención del Modelo particular integrado.

La concreción de las alternativas disponibles en el ejemplo de aplicación (Paso 1), la determinación de los parámetros aplicables a cada una de ellas (Paso 2), el cálculo de los valores asociados a cada parámetro (Paso 3) y la ponderación de los factores de sostenibilidad (Paso 4), constituyen los pasos de la metodología de adaptación del modelo

genérico integrado al modelo particular integrado, compuesto por el modelo particular del PLI con el subproceso de solución y por el modelo matemático particular.

Los principales cambios realizados al modelo genérico del PLI en el proceso de adaptación al modelo particular del presente ejemplo de aplicación son los siguientes:

1. Se desdobra la alternativa de reutilización, introduciendo la decisión sobre qué tipo de reutilización a realizar, si es por el mercado primario o secundario.
2. Adaptación del transporte previo a la intervención sobre el producto porque se realiza en las mismas instalaciones.
3. Adaptación de la alternativa de reciclaje sin contemplar el transporte hasta el centro de reciclaje.
4. No se plantea la alternativa de incineración ni vertido

Para poder mostrarlo más claramente, se presenta a continuación el modelo genérico del PLI integrado (Figura 243) en el que se han marcado los principales cambios para la adaptación al modelo particular integrado. Posteriormente, se presenta el modelo particular del PLI integrado (Figura 244) correspondiente al ejemplo de aplicación de los sillones de relax.

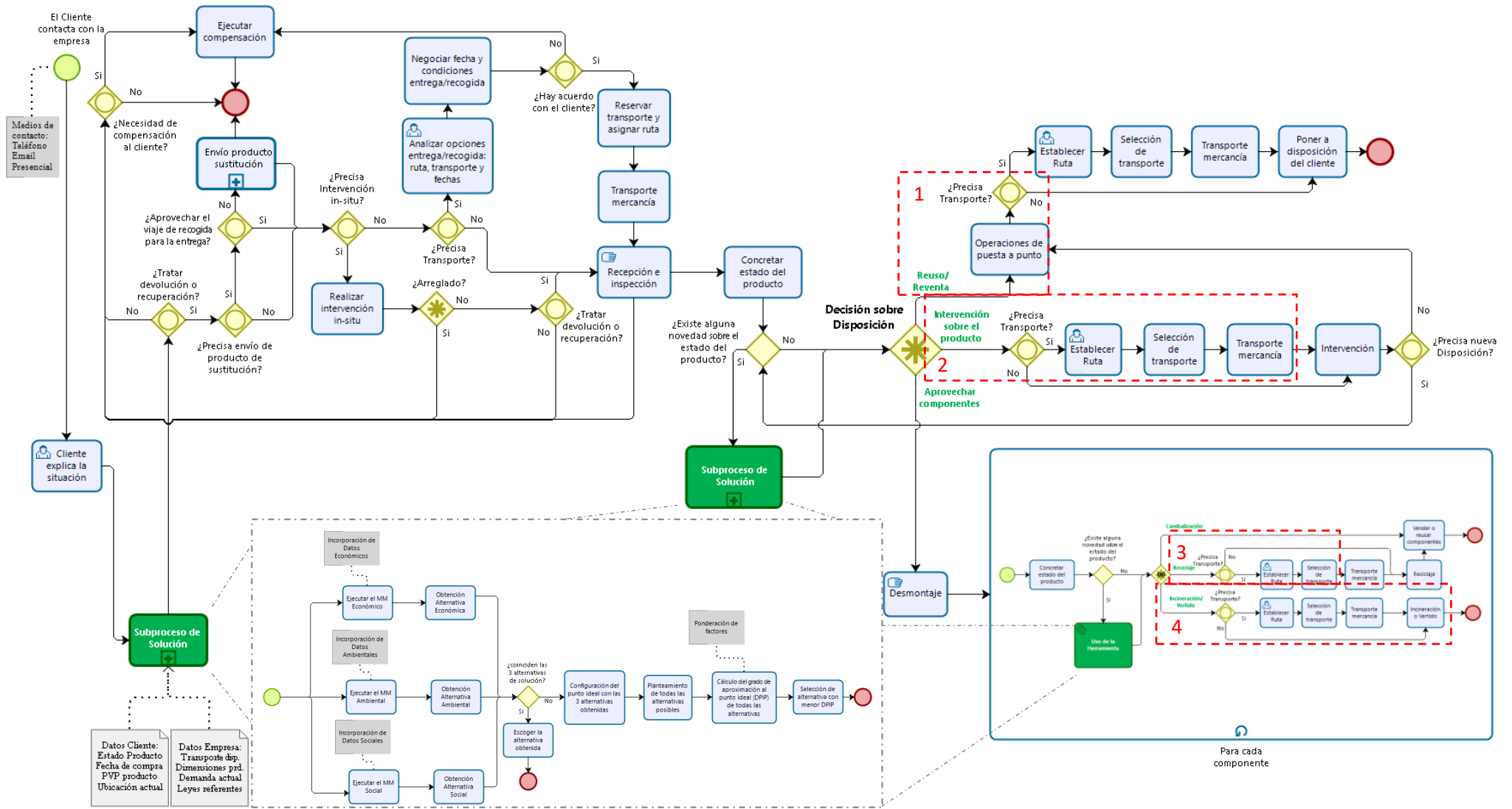


Figura 243. Modelo genérico del PLI integrado mostrando con un marco rojo indicando dónde se introducen los cambios en la adaptación (Elaboración Propia)

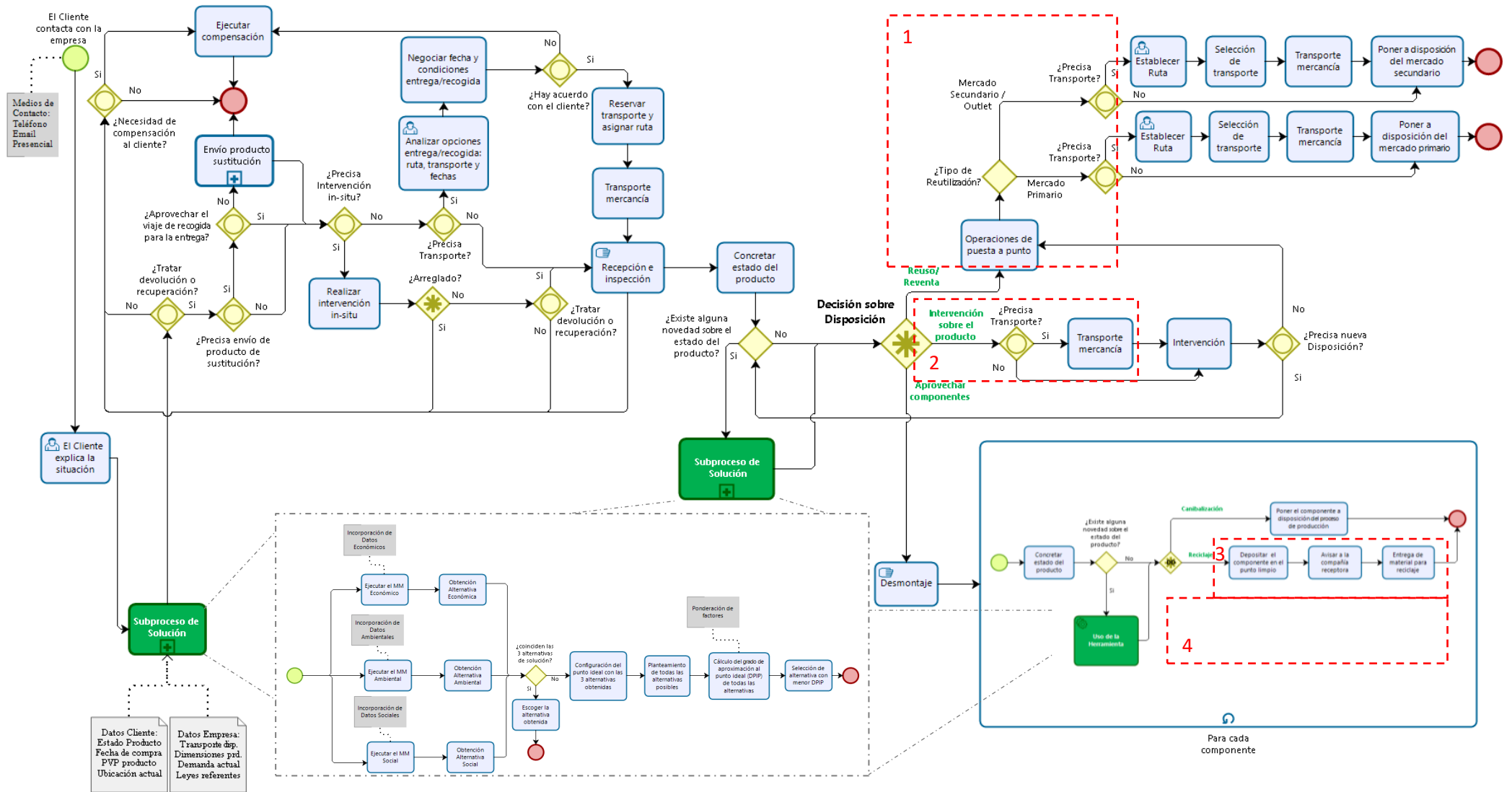


Figura 244. Modelo particular del PLI integrado con un marco rojo indicando dónde se introducen los cambios en la adaptación al ejemplo de aplicación de los sillones de relax

(Elaboración propia).

Asimismo, se presenta cómo ha quedado el modelo matemático particular tras la aplicación de la metodología de adaptación:

**Variables de decisión:**

Como se puede apreciar, se ha desdoblado la alternativa de reutilización para dar cabida al mercado secundario y se han anulado las alternativas no aplicables (reparación, refabricación, incineración y vertido) al caso de los sillones de relax.

<b>REU<sub>i</sub></b>	}	1	si la decisión de disposición del producto <i>i</i> es
		0	<b>Reutilizar/revender</b> en el mercado primario como nuevo en caso contrario
<b>OUT<sub>i</sub></b>	}	1	si la decisión de disposición del producto <i>i</i> es
		0	<b>Reutilizar/revender</b> en el mercado secundario tipo Outlet en caso contrario
<b>REF<sub>i</sub></b>	}	1	si la decisión de disposición del producto <i>i</i> es
		0	<b>Reacondicionamiento</b> en caso contrario
<b>CAN<sub>i,j</sub></b>	}	1	si la decisión de disposición del componente <i>j</i> del producto <i>i</i> es <b>Canibalización</b>
		0	en caso contrario
<b>REC<sub>i,j</sub></b>	}	1	si la decisión de disposición del componente <i>j</i> del producto <i>i</i> es <b>Reciclaje</b>
		0	en caso contrario

Las otras alternativas de disposición (reparación, remanufacturación, incineración y vertido) no se consideran en este ejemplo de aplicación, por lo que:

$$\mathbf{REP}_i = \mathbf{REM}_i = \mathbf{BUR}_{i,j} = \mathbf{DIS}_{i,j} = \mathbf{0}$$

**Función objetivo:**

A continuación, se presenta la función objetivo separada en tres bloques: la maximización de la rentabilidad económica (Z1), la minimización del impacto ambiental (Z2) y la maximización del impacto social (Z3). Para mostrar más claramente la adaptación al modelo particular, primero se presentan las funciones del modelo genérico (expuestas en el Capítulo 9) y posteriormente las funciones adaptadas al caso particular.

**Maximización de la rentabilidad económica en el modelo matemático genérico:**

$$\text{Max } Z_1 = \{ \sum_i [\text{Sreu}_i \text{REU}_i + \text{Srep}_i \text{REP}_i + \text{Sref}_i \text{REF}_i + \text{Srem}_i \text{REM}_i] + \quad (9-1)$$

$$+ \sum_i \sum_j [\text{Scan}_{i,j} \text{CAN}_{i,j} + \text{Srec}_{i,j} \text{REC}_{i,j}] + \quad (9-2)$$

$$+ \sum_i \sum_j [\text{Sbur}_{i,j} \text{BUR}_{i,j}] + \quad (9-3)$$

$$+ \text{SUB}_{i,j} \} - \quad (9-4)$$

$$- \{ \sum_i [ \text{CP}_i + \text{CT}_{1i} + \text{COL}_i + \text{CLE}_{i,j} + \text{CIS}_{i,j} ] + \quad (9-5)$$

$$+ \sum_i [ [ \text{COP}_i + \text{CS}_{1,i} + \text{CT}_{2,i} ] + [ \text{Crep}_i \text{REP}_i + \text{Cref}_i \text{REF}_i + \text{Crem}_i \text{REM}_i ] ] \\ [ \text{REU}_i + \text{REP}_i + \text{REF}_i + \text{REM}_i ] + \quad (9-6)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ [ \text{CL}_{i,j} + \text{CS}_{2i,j} + \text{CT}_{3i,j} ] + [ \text{Ccan}_{i,j} \text{CAN}_{i,j} + \text{Crec}_{i,j} \text{REC}_{i,j} ] ] [ \text{CAN}_{i,j} + \\ + \text{REC}_{i,j} ] + \quad (9-7)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ [ \text{CS}_{3i,j} + \text{CT}_{4i,j} ] + [ (\text{Cbur}_{i,j} + \text{Crm}_{i,j}) \text{BUR}_{i,j} + \text{Cdis}_{i,j} \text{DIS}_{i,j} ] ] [ \text{BUR}_{i,j} + \\ + \text{DIS}_{i,j} ] \} \quad (9-8)$$

**Maximización de la rentabilidad económica en el modelo matemático particular:**

Se eliminan las alternativas no aplicables y los parámetros asociados, así como se introducen los parámetros modificados en el caso particular.

$$\text{Max } Z_1 = \{ \sum_i [\text{Sreu}_i \text{REU}_i + \text{Sout}_i \text{OUT}_i + \text{Sref}_i \text{REF}_i] + \quad (14-1)$$

$$+ \sum_i \sum_j [\text{Scan}_{i,j} \text{CAN}_{i,j} + \text{Srec}_{i,j} \text{REC}_{i,j}] - \quad (14-2)$$

$$- \{ \sum_i [ \text{CP}_i + \text{CT}_{1i} + \text{CIS}_{i,j} ] + \quad (14-3)$$

$$+ \sum_i [ [ \text{COP}_i + \text{CS}_{1,i} + \text{CT}_{2,i} ] + [ \text{Cref}_i \text{REF}_i ] [ \text{REU}_i + \text{OUT}_i + \text{REF}_i ] + \quad (14-4)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ [ \text{CDIS}_{i,j} + \text{CL}_{i,j} + \text{CS}_{2i,j} + \text{CT}_{3i,j} ] + [ \text{Ccan}_{i,j} \text{CAN}_{i,j} + \text{Crec}_{i,j} \text{REC}_{i,j} ] ] \\ [ \text{CAN}_{i,j} + \text{REC}_{i,j} ] + \quad (14-5)$$

**Minimización del impacto ambiental en el modelo matemático genérico:**

$$\text{Min } Z_2 = \sum_i \text{EIT}_{1i} + \quad (9-9)$$

$$+ \sum_i [ EIT_{2i} + [ EIT_{3i} (REP_i + REF_i + REM_i) + EIP_{1i} REP_i + EIP_{2i} REF_i + EIP_{3i} REM_i ] ] [REU_i + REP_i + REF_i + REM_i] + \quad (9-10)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ EIT_{4i,j} + EIP_{4i,j} CAN_{i,j} + EIR_{i,j} REC_{i,j} ] [ CAN_{i,j} + REC_{i,j} ] + \quad (9-11)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ EIT_{5i,j} + EII_{i,j} BUR_{i,j} + EIL_{i,j} DIS_{i,j} ] [ BUR_{i,j} + DIS_{i,j} ] \quad (9-12)$$

**Minimización del impacto ambiental en el modelo matemático particular:**

Se eliminan los parámetros ambientales referentes a las alternativas no aplicables y a las operaciones asociadas, así como se introducen los parámetros modificados en el caso particular.

$$\text{Min } Z_2 = \sum_i EIT_{1i} + \quad (14-6)$$

$$+ \sum_i [ EIT_{2i} + [ EIP_{2i} REF_i ] ] [REU_i + OUT_i + REF_i] + \quad (14-7)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ [EIP_{1i,j} + EIP_{3i,j}] CAN_{i,j} + [EIP_{1i,j} + EIT_{3i,j} + EIR_{i,j}] REC_{i,j} ] \quad (14-8)$$

**Maximización del impacto social en el modelo matemático genérico:**

$$\text{Max } Z_3 = \sum_i (W_{1i} * \mu_{1i}) + \quad (9-13)$$

$$+ \sum_i [ (W_{2i} * \mu_{2i}) + [ (W_{3i} * \mu_{3i}) (REP_i + REF_i + REM_i) + (W_{rep_i} * \mu_{rep_i}) * REP_i + (W_{ref_i} * \mu_{ref_i}) * REF_i + (W_{rem_i} * \mu_{rem_i}) * REM_i ] ] [REU_i + REP_i + REF_i + REM_i] + \quad (9-14)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ (W_{4i,j} * \mu_{4i,j}) + (W_{can_{i,j}} * \mu_{can_{i,j}}) * CAN_{i,j} + (W_{rec_{i,j}} * \mu_{rec_{i,j}}) * REC_{i,j} ] [ CAN_{i,j} + REC_{i,j} ] + \quad (9-15)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ (W_{5i,j} * \mu_{5i,j}) + (W_{bur_{i,j}} * \mu_{bur_{i,j}}) * BUR_{i,j} + (W_{dis_{i,j}} * \mu_{dis_{i,j}}) * DIS_{i,j} ] [ BUR_{i,j} + DIS_{i,j} ] \quad (9-16)$$

**Maximización del impacto social en el modelo matemático particular:**

Se eliminan los parámetros de impacto social de las alternativas no aplicables en el caso particular.

$$\text{Max } Z_3 = \sum_i (W_{1i} * \mu_{1i}) + \quad (14-9)$$

$$+ \sum_i [ (W_{2i} * \mu_{2i}) + [(W_{ref_i} * \mu_{ref_i})] * REF_i ] [REU_i + OUT_i + REF_i] + (14-10)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ (W_{4i,j} * \mu_{4i,j}) + (W_{rec_{i,j}} * \mu_{rec_{i,j}}) * REC_{i,j} ] * [ CAN_{i,j} + REC_{i,j} ] \quad (14-11)$$



El modelo particular **maximiza la rentabilidad económica** basándose, inicialmente, en los ingresos obtenidos a través de diferentes alternativas de disposición, dependiendo de si se reintroducen en el mercado (14-1) o si se aprovechan los componentes (14-2). Se deben descontar los costes incurridos de acuerdo con la disposición aplicada, considerando los costes comunes a todas las alternativas (14-3), los costes correspondientes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (14-4) y los costes correspondientes a las alternativas de sacar provecho de los componentes (14-5).

Asimismo, el modelo busca **minimizar el impacto ambiental** basado en las acciones correspondientes a las diferentes alternativas de disposición, de acuerdo con el impacto ambiental común a todas las alternativas (14-6), las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (14-7) y el impacto correspondiente a las alternativas de tratar de aprovechar el valor de los componentes (14-8).

Además, el modelo pretende **maximizar el impacto social** basado en las operaciones correspondientes a las diferentes alternativas de disposición, de acuerdo con el impacto social común a todas las alternativas (14-9), el impacto social referente a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (14-10) y el impacto correspondiente a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de los componentes (14-11).

**Restricciones:**

A continuación, se muestran las restricciones del modelo matemático genérico:

$$\sum_{i=1}^I (REU_i + REP_i + REF_i + REM_i + \frac{\sum_{j=1}^J CAN_{i,j}}{J} + \frac{\sum_{j=1}^J REC_{i,j}}{J} + \frac{\sum_{j=1}^J BUR_{i,j}}{J} + \frac{\sum_{j=1}^J DIS_{i,j}}{J}) = 1; \forall_{i,j} \quad (9-17)$$

En la adaptación al modelo particular, se cumple que, cuando el producto se trata sin desmontar, tenga sólo una disposición y que, cuando el producto se desensambla en componentes, estos se puedan canibalizar o reciclar, limitando las alternativas a aquellas que son aplicables, según la siguiente restricción

$$\sum_{i=1}^I (REU_i + OUT_i + REF_i + \frac{\sum_{j=1}^J CAN_{i,j}}{J} + \frac{\sum_{j=1}^J REC_{i,j}}{J}) = 1; \forall_{i,j} \quad (14-12)$$

Una vez aplicada la metodología para la adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado, se ha obtenido el modelo del PLI y el modelo matemático adaptados al ejemplo de aplicación. Con toda esta información ya se está en disposición

de recuperar productos y determinar en cada caso la mejor alternativa de disposición. Para facilitar dicha tarea a la empresa, se va a desarrollar a continuación un manual de usuario que facilite la operabilidad por parte del personal decisor de la empresa. Se utilizarán los valores calculados en el presente apartado como ejemplo genérico para ilustrar cómo funciona el manual de usuario.

### **14.3. Desarrollo del manual de usuario para la gestión de las recuperaciones**

Todo lo desarrollado hasta este punto tendría por objetivo la elaboración del modelo particular integrado. Este trabajo correspondería a un rol de desarrollador/consultor que se ocuparía normalmente de adaptar el modelo genérico integrado a cada caso concreto, pasando del Bloque III al Bloque IV del MR.

Una vez desarrollado el modelo particular (Bloque IV), este estaría listo para su utilización en el día a día de la empresa. En este caso, el modelo desarrollado, permitiría tomar la decisión más sostenible posible para cada sillón recuperado en la gestión diaria de la empresa, pero faltaría parametrizar los valores en función de cada producto recuperado. Este trabajo más cotidiano de uso y parametrización de la herramienta se llevaría a cabo, normalmente, por el personal de la empresa usuario de la herramienta (departamento comercial, ventas, atención al cliente, etc.) que debería recibir la correspondiente formación por parte del desarrollador/consultor.

Con el objetivo de acompañar y complementar esta labor de formación, a continuación, se incluye un *manual de usuario para la gestión de las recuperaciones* (o guía de utilización) de la herramienta matemática.

#### **14.3.1. Manual de usuario para la gestión de las recuperaciones**

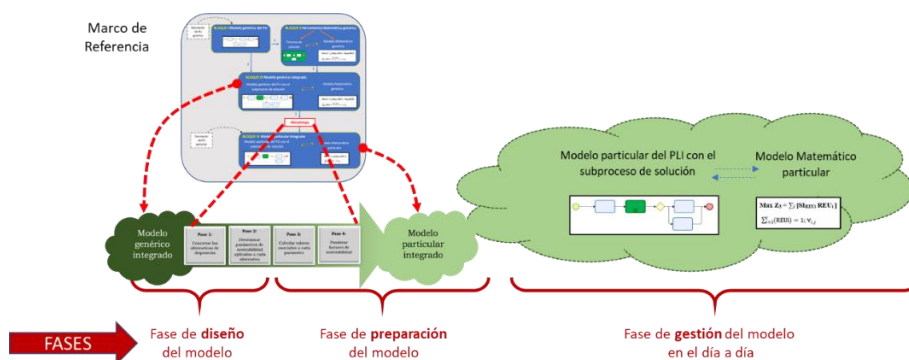
El manual de usuario para la gestión de las recuperaciones servirá como guía para el personal de la empresa usuario de la herramienta, a la hora de determinar la mejor alternativa de disposición de un producto devuelto o recuperado.

Como se ha comentado en anteriores apartados, el Bloque III del MR se compone del modelo genérico del PLI con el subproceso de solución integrado y del modelo matemático genérico, dando lugar al modelo genérico integrado.

Mediante la metodología de adaptación propuesta, se pretende obtener el modelo particular integrado (Bloque IV) a partir de este modelo genérico integrado (Bloque III). Así, los pasos de la metodología pretenden ayudar a diseñar y a preparar el modelo particular integrado que posteriormente será utilizado en la gestión del día a día de la empresa. Se podrían definir, por lo tanto, tres fases generales en la obtención y gestión del modelo matemático particular; dos de ellas centradas en la obtención y preparación del modelo matemático particular; que estarían abarcando la propia metodología del MR, y una tercera fase centrada en la gestión del modelo particular obtenido para atender las recuperaciones de producto que vayan llegando. Estas Fases serían:

1. **Fase de diseño del modelo particular integrado.** Se correspondería con los dos primeros pasos de la metodología de adaptación, en los que se diseña el modelo particular concretando las alternativas de disposición factibles en el caso particular y determinando los parámetros de sostenibilidad aplicados a cada alternativa.
2. **Fase de preparación del modelo particular integrado.** Se correspondería con los dos últimos pasos de la metodología de adaptación, que se llevan a cabo para calcular los valores asociados a cada parámetro y ponderar los factores de sostenibilidad.
3. **Fase de gestión del modelo particular integrado en el día a día.** En esta fase se determinarán los datos particulares de cada caso, para poderlos introducir en el modelo matemático particular y obtener la mejor alternativa de disposición para cada producto a través del subproceso de solución.

En la zona inferior de la siguiente figura se ilustran estas tres fases en relación con el MR propuesto:

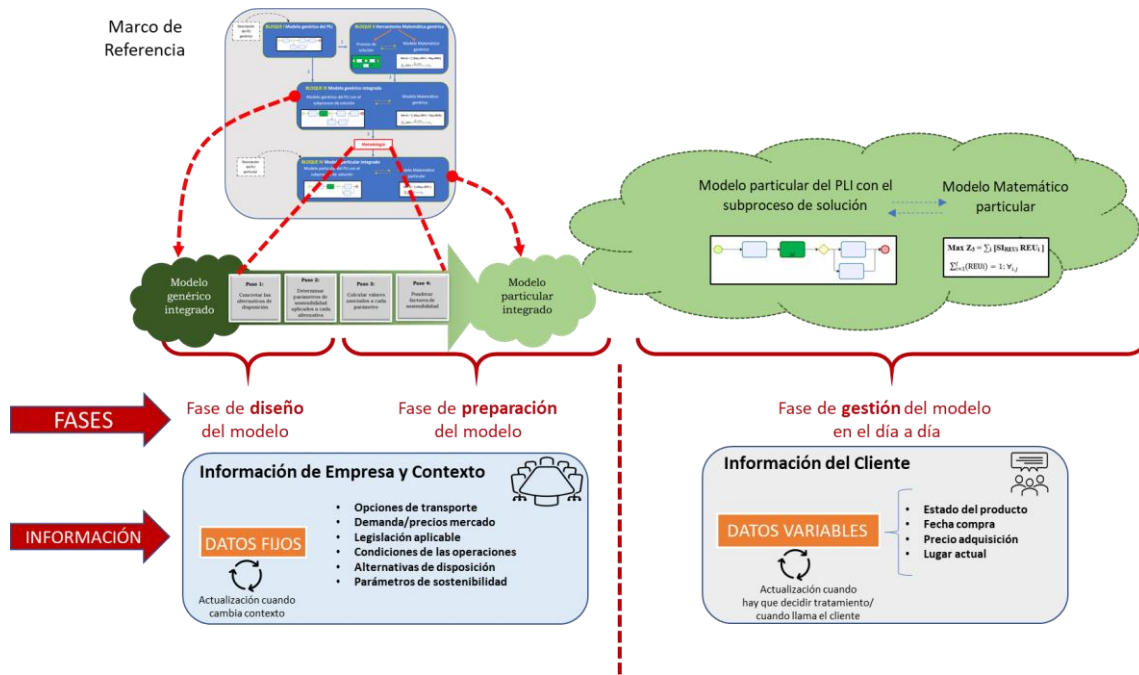


**Figura 245.** Contextualización de las tres Fases generales en la obtención y gestión del modelo matemático particular (Elaboración Propia)

La correcta ejecución de las tres fases anteriores precisa de un conjunto de información que se explica a continuación. Por un lado, las fases de diseño y preparación del modelo utilizan información de la empresa y del contexto en el que se ejecutan las operaciones, relacionada con: opciones de transporte, demanda/precios del mercado, legislación aplicable, condiciones de las operaciones, alternativas de disposición y parámetros de sostenibilidad. Toda esta información servirá para establecer aquellos **datos fijos** de referencia que posteriormente serán utilizados en la herramienta, a diario, para determinar la mejor alternativa de disposición en cada caso. Los valores correspondientes a los datos fijos se estarán revisando y actualizando continuamente por parte de la empresa, sin depender de la situación de cada producto ni de la información que aporte el cliente con respecto al ejemplo. Aunque no suelen variar de manera frecuente, la empresa los deberá conocer y controlar, para poder actualizarlos cuando proceda.

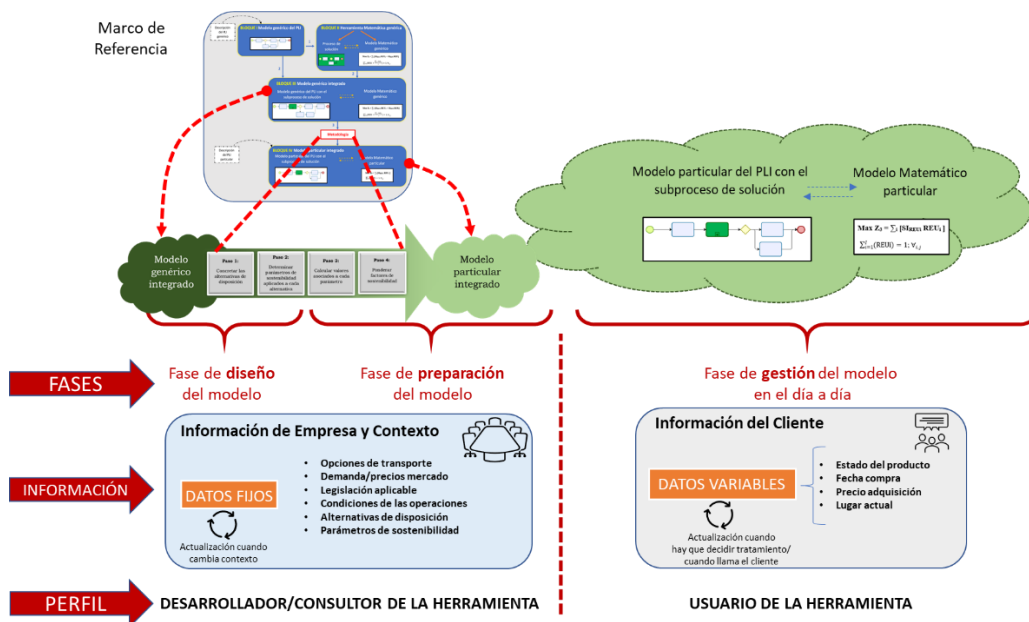
Por otro lado, la fase de gestión del modelo en el día a día utiliza información que le aporta el cliente en cada caso concreto, relacionada con: estado del producto, fecha de compra, precio de adquisición y lugar actual. Esta información servirá para establecer aquellos **datos variables**, propios de cada caso, que posteriormente serán utilizados en la herramienta, junto con los datos fijos, para determinar la mejor alternativa de disposición en cada caso. De este modo, los valores de los datos variables dependen de cada producto devuelto o recuperado, actualizándose cada vez que hay una entrada de producto o contacto con algún cliente y se debe decidir el tratamiento a aplicar.

En la zona inferior de la siguiente figura, se representa la información utilizada en cada una de las tres Fases mencionadas anteriormente:



**Figura 246.** Contextualización de las tres Fases generales en la obtención y gestión del modelo matemático particular y la información utilizada en cada fase (Elaboración Propia)

Por otra parte, cabe tener en cuenta el perfil de los roles que ejecutaría cada una de las fases; las fases de diseño y preparación del modelo serían llevadas a cabo por parte del desarrollador/consultor de la herramienta, mientras que la fase de gestión diaria del modelo sería llevada a cabo por parte del personal de la empresa usuario de la herramienta, tal y como se indica en la siguiente figura:



**Figura 247.** Contextualización de las tres Fases generales en la obtención y gestión del modelo matemático particular, la información utilizada y el perfil necesario en cada fase (Elaboración Propia)

Precisamente para que el usuario de la herramienta aprenda a desarrollar esta última fase con las mayores garantías de éxito y pueda obtener así la alternativa más sostenible, se ha propuesto **el manual de usuario para la gestión de las recuperaciones**, de manera que toda estas fases de trabajo y la información aportada por el cliente, la empresa y el contexto de las operaciones necesarias, sirven de entrada, junto con el modelo particular integrado, para utilizarlo, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

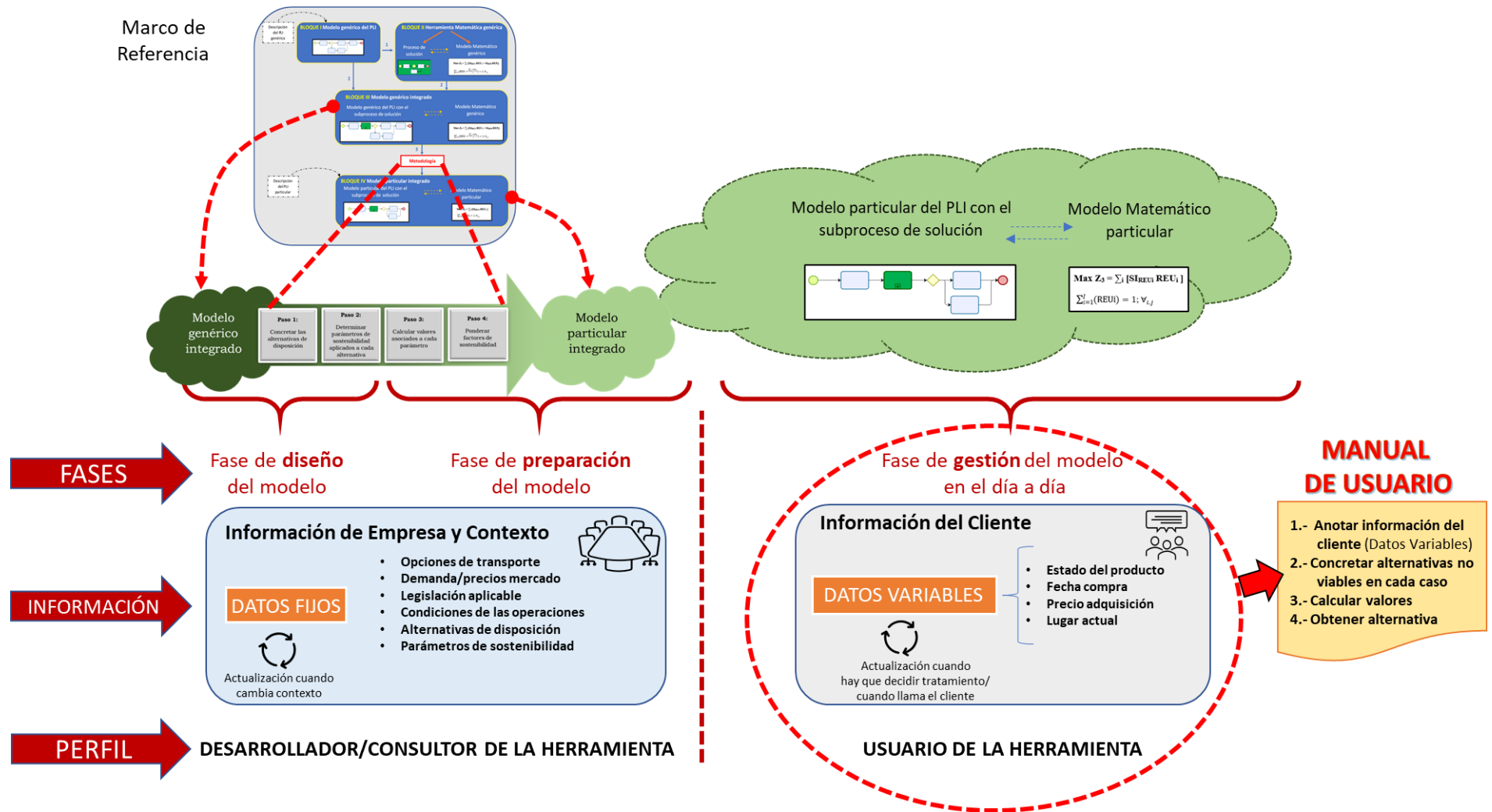


Figura 248. Contextualización y contenido del manual de usuario para la gestión de la recuperación de productos (Elaboración propia)

Como se ha podido apreciar anteriormente, los datos referentes a los valores de los parámetros del modelo matemático son diferenciados entre datos fijos y variables. Para poder conocer cuáles son clasificados en cada grupo, a continuación, se muestran tres tablas (Tabla 35, Tabla 36 y Tabla 37) con los parámetros económicos, ambientales y sociales del ejemplo básico de los sillones de relax, categorizados entre valores fijos y variables. Para ello, los fijos son marcados con una “F” sobre un fondo rosa y, los variables, con una “V” sobre un fondo naranja.

<b>INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
<b>Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:</b>		
<b>Sreu<sub>i</sub></b>	ingresos por reutilización del producto i como nuevo	V
<b>Sout<sub>i</sub></b>	ingresos por reutilización del producto i en el mercado secundario	V
<b>Sref<sub>i</sub></b>	ingresos por reacondicionamiento del producto i	V
<b>Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:</b>		
<b>Scan<sub>i,1</sub></b>	ingresos por canibalización del componente 1 (estructura) obtenido del producto i	V
<b>Srec<sub>i,1</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 1 (estructura) obtenido del producto i	F
<b>Scan<sub>i,2</sub></b>	ingresos por canibalización del componente 2 (motor) obtenido del producto i	V
<b>Srec<sub>i,2</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 2 (motor) obtenido del producto i	F
<b>Scan<sub>i,3</sub></b>	ingresos por canibalización del componente 3 (tapizado) obtenido del producto i	V
<b>Srec<sub>i,3</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 3 (tapizado) obtenido del producto i	F
<b>COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>CP<sub>i</sub></b>	coste de recuperación del producto i desde el cliente	V
<b>CT<sub>1i</sub></b>	coste de transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	V
<b>CIS<sub>i</sub></b>	coste de inspección y clasificación del producto i	F
<b>COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
<b>Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:</b>		
<b>COP<sub>i</sub></b>	coste de embalaje del producto i para reutilización o reventa	F
<b>CS<sub>1i</sub></b>	coste de almacenaje del producto i antes de la reutilización o reventa	V
<b>CT<sub>2i</sub></b>	coste de transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente	V
<b>Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:</b>		
<b>CDIS<sub>i1</sub></b>	Coste de desensamblaje del componente 1 (estructura) del producto i	F
<b>CDIS<sub>i2</sub></b>	Coste de desensamblaje del componente 2 (motor) del producto i	F
<b>CDIS<sub>i3</sub></b>	Coste de desensamblaje del componente 3 (tapizado) del producto i	F
<b>CL<sub>i,j</sub></b>	coste de etiquetado del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización	F
<b>CS<sub>2i,j</sub></b>	coste de almacenaje del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización	F
<b>CT<sub>3i,j</sub></b>	coste de transporte del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización	F
<b>Costes específicos de cada alternativa de disposición</b>		
<b>Cref<sub>i</sub></b>	coste de reacondicionamiento del producto i	V



PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

**Tabla 35.** Parámetros económicos aplicables al ejemplo de los sillones de relax con la distinción de fijos y variables (Elaboración propia).

PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
<b>EIT<sub>1i</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	V
PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>EIT<sub>2Ai</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente de mercado primario	V
<b>EIT<sub>2Bi</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente de mercado secundario tipo outlet	V
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>EIP<sub>1i1</sub></b>	Impacto ambiental del desmontaje del componente 1 (estructura) del producto i	F
<b>EIP<sub>1i2</sub></b>	Impacto ambiental del desmontaje del componente 2 (motor) del producto i	F
<b>EIP<sub>1i3</sub></b>	Impacto ambiental del desmontaje del componente 3 (tapizado) del producto i	F
<b>EIT<sub>3i1</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 1 (estructura) del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje	F
<b>EIT<sub>3i2</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 2 (motor) del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje	F
<b>EIT<sub>3i3</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3 (tapizado) del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje	F
PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
<b>EIP<sub>2i</sub></b>	impacto ambiental de reacondicionamiento del producto i	V
<b>EIR<sub>i1</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 1 (estructura) del producto i	F
<b>EIR<sub>i2</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 2 (motor) del producto i	F
<b>EIR<sub>i3</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 3 (tapizado) del producto i	F

**Tabla 36.** Parámetros ambientales aplicables al ejemplo de los sillones de relax con la distinción de fijos y variables (Elaboración propia).

<b>Wt<sub>1</sub>*μt<sub>1</sub></b>	Tiempo de recogida del producto del cliente * factor regional	V
<b>Wp<sub>1</sub>*μp<sub>1</sub></b>	Tiempo de descarga del sillón en la empresa * factor regional	F
PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>Wp<sub>2</sub>*μp<sub>2</sub></b>	Tiempo para las tareas de puesta a punto del sillón * factor regional	F
<b>Wt<sub>2a</sub>*μt<sub>2a</sub></b>	Tiempo de entrega del producto al cliente de reutilización * factor regional	V
<b>Wt<sub>2b</sub>*μt<sub>2b</sub></b>	Tiempo de entrega del producto al cliente de outlet* factor regional	V
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Wp<sub>3</sub>*μp<sub>3</sub></b>	Tiempo de desmontaje del producto* factor regional	F

PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
$W_{preu} * \mu_{preu}$	Tiempo de reacondicionamiento del producto * factor regional	V
$W_{tcan} * \mu_{tcan}$	Tiempo de transporte para Canibalización de componentes* factor regional	F
$W_{trec} * \mu_{trec}$	Tiempo de transporte interior para Reciclaje de componentes * factor regional	F
$W_{prec1} * \mu_{prec1}$	Tiempo para reciclaje de la estructura * factor regional	F
$W_{prec2} * \mu_{prec2}$	Tiempo para reciclaje del motor * factor regional	F
$W_{prec3} * \mu_{prec3}$	Tiempo para reciclaje del tapizado * factor regional	F

**Tabla 37.** Parámetros sociales aplicables al ejemplo de los sillones de relax con la distinción de fijos y variables (Elaboración propia).

Teniendo claro los parámetros que corresponden a los datos fijos y a los datos variables, así como el funcionamiento del modelo particular integrado, se está en disposición de ejecutar la herramienta con ayuda del manual de usuario para la gestión de recuperaciones. Dicho manual de usuario contendrá los siguientes pasos:

1. **Anotar toda la información que nos aporta el cliente, respecto al estado del producto, fecha de compra, coste o precio de adquisición y lugar en el que se encuentra,** para calcular los valores de los datos variables.
2. **Concretar las alternativas de disposición que no son viables para cada producto en cuestión,** las cuales no serán contempladas en la aplicación de la herramienta. En el caso de los sillones, por ejemplo, si no está en perfecto estado no se contemplará la reutilización directa o venta en el mercado primario directamente sin intervenir.
3. **Calcular los valores de cada dimensión de sostenibilidad:**

Toda la información obtenida en los pasos anteriores sirve para calcular los valores fijos y variables de la herramienta:

- a. **Valores fijos:** Se pueden tomar como referencia, los valores calculados en la metodología de adaptación del modelo genérico al modelo particular y, en base a la información aportada por el cliente y la información que maneja la empresa, determinar si los valores fijos con los que cuenta el ejemplo básico y general se deben modificar o no.
- b. **Valores variables:** En base a la información aportada por el cliente y los datos que maneja la empresa, se calculan los valores, considerados variables, en cada sillón.

- 4. Obtener la alternativa de disposición más adecuada mediante la ejecución del subproceso de solución.** En el apartado siguiente, se muestra la ejecución del subproceso de solución aplicado al ejemplo genérico utilizado para calcular los valores de referencia.

#### **14.3.2. Ejecución del subproceso de solución.**

La ejecución del subproceso de solución se realiza en base a los valores del ejemplo genérico de referencia obtenidos en el paso 3 de la metodología de adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado.

Las características técnicas para realizar la ejecución del subproceso de solución, en el presente ejemplo de aplicación, no requieren de gran inversión en recursos tecnológicos. El software utilizado para resolver el modelo matemático ha sido una versión gratuita del programa MPL, versión 5.0.8 para Windows, en un entorno de Microsoft Windows 10 home a 64 bits, con un procesador Intel(R) Core (TM) i3. El tiempo medio de cálculo ha sido menor a un minuto.

Las bases de Datos, de entrada y salida de Datos, conectada con el software MPL, para cada ejemplo de aplicación se ha realizado a través de la aplicación Acces de Microsoft Office, en su versión 365 ProPlus.

##### **14.3.2.1. Valores económicos**

En el apartado anterior, se ha adaptado el modelo matemático genérico al caso real objeto de estudio y se han obtenido los valores de la rentabilidad económica correspondientes a cada alternativa de disposición. En este sentido, tal y como se ha justificado, las alternativas de disposición con la finalidad de reintroducción en el mercado son tres: reutilización (**REUSE**), outlet (**OUTLET**) y reacondicionamiento (**REFURBISH**). Al mismo tiempo, las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, para los tres componentes con los que se trabaja, son dos: canibalización (**CANNIBALIZATION**) y reciclaje (**RECYCLE**).

Una vez calculados los valores económicos (según el apartado 14.2.3), se introducen en la BBDD correspondiente al modelo matemático económico. Como se puede apreciar en la figura siguiente (Figura 249): en el cuadrante superior izquierdo (color marrón), se introducen los valores económicos de las alternativas de tratamiento del producto en su

conjunto y en el cuadrante inferior izquierdo (color verde), los valores económicos correspondientes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, de manera que hay una fila para cada componente y una columna para cada ingreso/coste. En la parte derecha de la BBDD, se muestran las alternativas de tratamiento posibles (parte superior – azul, las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado; parte inferior – amarillo, alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes). Tras ejecutar el software MPL con el solucionador CPLEX, se indica la alternativa seleccionada en la misma BBDD (en el anexo del presente capítulo, Anexo 14.5, se encuentra el archivo en lenguaje MPL de parámetros económicos correspondiente):

IdProduct	Sreu	Sout	Sref	CP	T1	INS	P	S1	T2	Cref	REUSE	OUTLET	REFURBISH
Prod1	650	520	650	650	12,5	3	10	0,3	12,5	65	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

IdCompone	Scan	Srec	DIS	L	S2	T3	Ccan	Crec	CANNIBALIZATION	RECYCLE
Comp1	131,56	0	1	0	0	3	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	116,3	1,62	9	0	0	3	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	158,83	108	15	0	0	3	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 249.** BBDD del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax  
(Elaboración propia)

Además, desde el software MPL se obtiene el archivo de solución, donde se observa información sobre la solución encontrada. Información como puede ser el valor de resultado óptimo y la alternativa escogida, entre otras cosas, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 250):

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode18BDD
Filename:          RLTHBDDDec.mpl
Date:              July 19, 2019
Time:              12:55
Parsing time:      3.43 sec
MPL version:       5.0.8.116
Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   -38.300000019
MIP best bound:    627.199999988
Integer nodes:     0
Improving nodes:  0
Iterations:        0
Solution time:     0.00 sec
Solver result:     Optimal integer solution found
Result code:       101
Constraints:       4
Variables:         15
Integers:          15
Nonzeros:          24
Density:           40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
  MAX Beneficio = -38.3000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REU[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REUPro             1.0000
  
```

**Figura 250.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax (Elaboración propia)

Como se aprecia en la figura anterior, la alternativa correspondiente a la reutilización (*REU*) se sitúa como la alternativa más rentable económicamente, con un resultado de -38'30 €/ud. Puesto que se ha contemplado la opción de devolver íntegramente el dinero al cliente y asumir todos los gastos por parte de la empresa, todos los resultados son negativos, siendo la reutilización la alternativa que ofrece una menor pérdida y, por tanto, un mejor resultado económico.

En esta alternativa (*REU*), el valor por el que se vende de nuevo el producto es similar al que se le abona al cliente por recuperarlo, por tanto, la mejor alternativa es aquella que incurre en menos gastos. Este caso es un ejemplo claro de devolución del producto, en el que la empresa se hace cargo del transporte de recogida del producto, observando claramente cómo se convierte en una práctica deficitaria para la empresa.

En este sentido, la empresa puede dejar de perder dinero si la diferencia entre los ingresos que percibe por vender de nuevo el producto y los gastos en los que incurre es positiva, siendo para ello preciso que el importe que recibe el cliente sea inferior que el precio de venta o que sea el cliente el que se haga cargo de los costes de transporte y demás operaciones necesarias para recuperar el producto.

El problema que se puede encontrar la empresa es que el sillón no pueda ser revendido directamente al precio inicial, debido a que no está en perfectas condiciones. Dicha situación se puede simular anulando la opción de reutilización en el programa, introduciendo el valor nulo para la variable de decisión correspondiente (*REU=0*). En ese caso, el programa muestra la siguiente solución:

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDD
Filename:         RLTHBDDDec.mpl
Date:            July 24, 2019
Time:            06:40
Parsing time:    2.83 sec
MPL version:    5.0.8.116
Solver name:    CPLEX (11.2.1)
Objective value: -103.300000012
MIP best bound: 562.199999988
Integer nodes:  0
Improving nodes: 0
Iterations:    0
Solution time:  0.01 sec
Solver result:  Optimal integer solution found
Result code:    101
Constraints:    4
Variables:     15
Integers:      15
Nonzeros:     24
Density:       40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = -103.3000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REF[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REFPR0             1.0000
    
```

Figura 251. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax con REU = 0 (Elaboración propia)

Se considera que, en este caso, la mejor opción es el reacondicionamiento (**REF**) por importe negativo de **-103'30**, siendo el resultado para esta alternativa mucho peor que la reutilización porque hay que añadirle los costes de intervención de reacondicionamiento del producto para poderlo dejar en perfectas condiciones.

La intervención de reacondicionamiento del producto está cifrada en una determinada cantidad para el presente ejemplo (**Cref=65**), pero si dicha cantidad aumenta porque la intervención a realizar es mucho más costosa, llegará un punto en el que los costes de reacondicionamiento serán superiores a los de la alternativa de Outlet, convirtiendo a esta última alternativa en la más adecuada. Dicho punto se cifra en un **Cref=130**, tal y como se aprecia a continuación, mostrando en primer lugar la simulación con **Cref=129** y posteriormente la simulación con **Cref =130**:

IdProduct	Sreu	Sout	Sref	CP	T1	COL	CLE	INS	P	S1	T2	Cref	REUSE	OUTLET	REFURBISH
Prod1	650	520	650	650	12,5	0	0	3	10	0,3	12,5	129	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

IdCompone	Scan	Srec	DISA	L	S2	T3	Ccan	Crec	CANNIBALIZAT	RECYCLE
Comp1	131,56	0	1	0	0	3	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	116,3	1,62	9	0	0	3	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	158,83	108	15	0	0	3	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 252. BBDD del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax con Cref = 129 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDD
Filename:         RLIMBBDDDec.mpl
Date:            July 24, 2019
Time:            06:48
Parsing time:    3.80 sec
MPL version:    5.0.8.116
Solver name:    CPLEX (11.2.1)
Objective value: -167.300000012
MIP best bound: 498.199999988
Integer nodes:  0
Improving nodes: 0
Iterations:    0
Solution time:  0.00 sec
Solver result:  Optimal integer solution found
Result code:   101
Constraints:   4
Variables:    15
Integers:     15
Nonzeros:     24
Density:      40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = -167.3000

DECISION VARIABLES
VARIABLE REF[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
REFPro             1.0000
    
```

Figura 253. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax con Cref = 129 (Elaboración propia)

IdProduct	Sreu	Sout	Sref	CP	T1	COL	CLE	INS	P	S1	T2	Cref	REUSE	OUTLET	REFURBISH
Prod1	650	520	650	650	12,5	0	0	3	10	0,3	12,5	130	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

IdCompone	Scan	Srec	DISA	L	S2	T3	Ccan	Crec	CANNIBALIZAT	RECYCLE
Comp1	131,56	0	1	0	0	3	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	116,3	1,62	9	0	0	3	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	158,83	108	15	0	0	3	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 254. BBDD del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax con Cref = 130 (Elaboración propia)

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModel1BBDD
Filename:          RLTMBBDDec.mpl
Date:              July 24, 2019
Time:              06:56
Parsing time:      3.27 sec
MPL version:       5.0.8.116
Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   -168.30000012
MIP best bound:    497.199999988
Integer nodes:     0
Improving nodes:   0
Iterations:        0
Solution time:     0.01 sec
Solver result:     Optimal integer solution found
Result code:       101
Constraints:       4
Variables:         15
Integers:          15
Nonzeros:          24
Density:           40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = -168.3000

DECISION VARIABLES
VARIABLE OUT[i] :
-----
Variable Name      Activity
-----
OUTPro             1.0000
    
```

Figura 255. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax con Cref = 130 (Elaboración propia)

Asimismo, en el caso en que las alternativas de intervención sobre el producto no estén disponibles o no sea viables ( $REU=0$ ,  $REF=0$ ,  $OUT=0$ ) el programa elige las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes más adecuadas, siendo el resultado:

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModel1BBDD
Filename:          RLTMBBDDec.mpl
Date:              July 24, 2019
Time:              07:01
Parsing time:      3.02 sec
MPL version:       5.0.8.116
Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   -292.809997559
MIP best bound:    372.690002441
Integer nodes:     0
Improving nodes:   0
Iterations:        0
Solution time:     0.00 sec
Solver result:     Optimal integer solution found
Result code:       101
Constraints:       4
Variables:         15
Integers:          15
Nonzeros:          24
Density:           40 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = -292.8100

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
    
```

Figura 256. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Sillones de Relax con  $REU=REF=OUT=0$  (Elaboración propia)



Como se puede apreciar, el resultado más conveniente para el caso de no poder reintroducir el producto en el mercado es la canibalización de los tres componentes.

**14.3.2.2. Valores ambientales**

Una vez obtenidos los valores del impacto **ambiental** de cada alternativa de disposición, se adaptará el modelo al caso real. Al igual que en el resto de FO, las alternativas de producto completo, con reintroducción en el mercado, son tres (reutilización, outlet y reacondicionamiento) y se trabaja con tres componentes que tienen opción de las alternativas de canibalización o reciclaje, según se puede apreciar en el archivo MPL de parámetros ambientales situado en el anexo del presente capítulo, igual que se ha procedido en los valores económicos.

Una vez introducidos los valores calculados en la BBDD correspondiente, se ejecuta el software MPL con el solucionador CPLEX, indicando la alternativa seleccionada en la misma BBDD, tal y como se puede apreciar en la figura siguiente (Figura 257):

IdProduct	EIT1	EIT2a	EIT2b	EIP2	REUSE	OUTLET	REFURBISH
Prod1	0,00296	0,00296	0,00188	0,0005	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

IdCompone	EIP1	EIT3	EIP3	EIR	CANNIBALIZATION	RECYCLE
Comp1	0,0000596	1,502E-05	0	0,00012	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	0,000536	0,00047	0	0,00012	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	0,000894	0,00096	0	0,00012	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 257.** BBDD del modelo matemático ambiental del ejemplo de aplicación Sillones de Relax (Elaboración propia)

Además, desde el software MPL se obtiene un archivo de solución, donde se aporta más información sobre la solución encontrada, como el valor de resultado óptimo y la alternativa escogida, entre otras cosas, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 258):

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentMode1BBDDamb
Filename: RLTMBBDDamb.mpl
Date: July 27, 2019
Time: 09:33
Parsing time: 4.43 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 0.0044495995730
MIP best bound: 0.00148960000297
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.01 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 11
Integers: 11
Nonzeros: 20
Density: 45 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp = 0.0044

DECISION VARIABLES
VARIABLE CAN[i,j] :
-----
Variable Name      Activity
-----
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
CANProCom          1.0000
    
```

Figura 258. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental del ejemplo de aplicación Sillones de Relax (Elaboración propia)

Finalmente, como era de esperar, la alternativa más apropiada desde la perspectiva ambiental es la **canibalización de los componentes**, ya que en este caso prácticamente no se interviene sobre los componentes y no hay transporte de entrega ni de traslado a otra empresa de disposición, puesto que se realiza en las mismas instalaciones.

### 14.3.2.3. Valores sociales

Mediante los valores del impacto social obtenidos para cada alternativa de disposición, se procede a adaptar el modelo al caso real objeto de estudio. En este sentido la adaptación del modelo se puede apreciar en el archivo MPL de parámetros sociales situado en el anexo del presente capítulo (Apartado 14.8.3).

Una vez introducidos los valores calculados en la BBDD, se puede ejecutar el programa MPL con el solucionador CPLEX y se obtiene la solución en la BBDD, tal y como se aprecia a continuación (Figura 259):

IdProduct	SI1	SI2A	SI2B	SIref	REUSE	OUTLET	REFURBI!
Prod1	1,403	1,403	0,935	0,33	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

IdCompone	SI4	SIrec	CANNIBALIZATION	RECYCLE
Comp1	0,122	0,577	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Comp2	0,439	0,814	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Comp3	0,676	1,05	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 259. BBDD del modelo matemático social del ejemplo de aplicación Sillones de Relax (Elaboración propia)

Además, desde el software MPL se obtiene el valor de resultado óptimo y la alternativa escogida tal y como se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 260):

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModelBBDDsoc
Filename:         RLTMBBDDsoc.mpl
Date:            July 25, 2019
Time:            18:37
Parsing time:     3.80 sec
MPL version:     5.0.8.116
Solver name:     CPLEX (11.2.1)
Objective value:  5.08099997044
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101
Constraints:     3
Variables:      12
Integers:       12
Nonzeros:       18
Density:        50 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 5.0810

DECISION VARIABLES
VARIABLE REC[i,j] :

Variable Name      Activity
-----
RECProCom          1.0000
RECProCom          1.0000
RECProCom          1.0000
    
```

**Figura 260.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social del ejemplo de aplicación Sillones de Relax (Elaboración propia)

Como se puede apreciar, la alternativa más apropiada desde la perspectiva social es el reciclaje de los componentes, ya que es la alternativa que precisa mayor dedicación por unidad para la disposición, existiendo además varios componentes que son tratados en provincias con una tasa de desempleo superior a la media nacional y a la de la provincia de Valencia que es donde se realizan la mayoría de las operaciones.

#### 14.3.2.4. Subproceso de solución

A través del software MPL se ha obtenido una alternativa de solución óptima para cada FO (económica, ambiental y social). En la tabla siguiente, se indican las tres alternativas de solución determinadas. Las tres primeras columnas hacen referencia a las alternativas de tratamiento del producto en su conjunto (**REU** – Reutilización, **OUT** – Outlet, **REF** – Reacondicionamiento) y el resto de las columnas hacen referencia al tratamiento de los componentes del producto, una vez desensamblado (**CAN** – Canibalización, **REC** – Reciclaje). De esta forma, las tres primeras alternativas hacen referencia a las alternativas de reintroducción del producto en el mercado y el resto de las alternativas hacen referencia a la combinación de tratamientos sobre los componentes. Además, se expone

la solución en forma de vector, de manera que se asigna un “1” a la alternativa más adecuada de cada función objetivo.

En esta línea, para la función objetivo económica, se selecciona la alternativa de reutilización (*REU*) como la más adecuada. La función ambiental contempla como alternativa seleccionada a la canibalización de los componentes (*CAN*). Por último, la función social obtiene como mejor alternativa el reciclaje de los componentes del producto (*REC*). Además, en la última columna de la tabla, se indica el valor óptimo de cada función objetivo

FUNCIÓN OBJETIVO	ALTERNATIVA SELECCIONADA									VALOR ÓPTIMO
	REU	OUT	REF	CAN			REC			
ECONÓMICA	1	0	0	0	0	0	0	0	0	- 38,30000
AMBIENTAL	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0,00440
SOCIAL	0	0	0	0	0	0	1	1	1	5,08100

**Tabla 38.** Alternativa seleccionada y valor óptimo para cada función objetivo (Elaboración propia).

Al tratarse de un problema multi-objetivo y al no coincidir las tres soluciones, la alternativa más adecuada será aquella que más se aproxime al punto ideal formado por los valores óptimos de las tres funciones objetivo, tal y como se ha explicado en capítulos anteriores.

En este caso, debido a las características analizadas, se contemplan once posibles soluciones, teniendo en cuenta que existen tres soluciones (*Soluciones 1 - 3*) que hacen referencia a las alternativas de disposición que reintroducen el producto en el mercado (*REU*, *OUT* y *REF*) y ocho posibles soluciones (*Soluciones 4 - 11*) que combinan las alternativas de disposición para el aprovechamiento de los componentes (*CAN* y *REC*).

	ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN								
	REU	OUT	REF	CAN			REC		
Solución 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Solución 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Solución 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Solución 4	0	0	0	1	1	1	0	0	0
Solución 5	0	0	0	1	1	0	0	0	1
Solución 6	0	0	0	1	0	1	0	1	0
Solución 7	0	0	0	1	0	0	0	1	1
Solución 8	0	0	0	0	1	1	1	0	0
Solución 9	0	0	0	0	1	0	1	0	1
Solución 10	0	0	0	0	0	1	1	1	0
Solución 11	0	0	0	0	0	0	1	1	1

**Tabla 39.** Relación de posibles soluciones (Elaboración propia).

Para proceder a descubrir cuál es la solución más adecuada, se trabaja con el peso correspondiente a cada uno de los objetivos. En base a la política de sostenibilidad de la empresa, la ponderación de los factores de sostenibilidad es la siguiente:

- Factores económicos: 60%
- Factores ambientales: 30%
- Factores sociales: 10 %

Una vez determinado el peso específico de cada objetivo, se muestra el grado de aproximación al punto ideal de cada alternativa (DPIP):

	ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN									Wj Econom.	Wj Ambiental	Wj Social.	DPIP
	REU	OUT	REF	CAN			REC			0,6	0,3	0,1	
Solución 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,10	0,04	0,15
Solución 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2,04	0,03	0,05	2,12
Solución 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1,02	0,14	0,04	1,19
Solución 4	0	0	0	1	1	1	0	0	0	3,99	0,00	0,05	4,04
Solución 5	0	0	0	1	1	0	0	0	1	4,78	0,08	0,03	4,89
Solución 6	0	0	0	1	0	1	0	1	0	5,78	0,04	0,03	5,86
Solución 7	0	0	0	1	0	0	0	1	1	6,58	0,12	0,01	6,71
Solución 8	0	0	0	0	1	1	1	0	0	6,05	0,01	0,04	6,10
Solución 9	0	0	0	0	1	0	1	0	1	6,84	0,09	0,02	6,95
Solución 10	0	0	0	0	0	1	1	1	0	7,84	0,05	0,02	7,92
Solución 11	0	0	0	0	0	0	1	1	1	8,64	0,13	0,00	8,77

Tabla 40. Valores de DPIP para cada posible solución (Elaboración propia).

En base a los resultados mostrados en la tabla anterior, se puede apreciar que la alternativa más adecuada sería **la reutilización/reventa en el mercado primario (Solución 1), es decir reintroducir en el mercado el producto con los mayores ingresos posibles y sin costes específicos (máxima rentabilidad económica) y sin intervención específica (mínimo impacto ambiental)**, ya que ofrece un valor más bajo de aproximación al punto ideal (DPIP). Claro está que para que el sillón sea revendido directamente al mercado, debe encontrarse en perfecto estado, si no, no sería posible dicha alternativa. Por tanto, lo primero que queda claro es que: **si el sillón se encuentra en perfecto estado, habrá que tratar de reintroducirlo en el mercado vendiéndolo de nuevo.**

No obstante, un sillón que tiene contemplada la opción de reacondicionamiento no debería contemplar la opción de reutilización o reintroducción en el mercado primario directamente sin intervenir, por tanto, asumiendo que el sillón no se encuentra en perfecto estado, se anularía la primera posible solución. En este caso, el modelo indica como

alternativa prioritaria reacondicionarlo para sacarlo de nuevo al mercado (**Solución 3 con DPIP = 1'19**).

Obviamente, si la ponderación de factores hubiese sido otra, la alternativa de disposición más adecuada se vería modificada. Por ejemplo, si perdiese peso el factor económico a favor del factor ambiental, la alternativa outlet llegaría a convertirse en la más adecuada, siempre después de la reutilización, debido a que dicha alternativa contempla mucho menor impacto ambiental que el reacondicionamiento.

Para ilustrar cómo funciona el manual, en el siguiente apartado, se aplica el manual de usuario de la herramienta matemática a tres casos reales.

#### **14.4. Aplicación del manual de usuario a tres productos recuperados**

Se describen, a continuación, tres casos reales de la empresa de sillones de relax en los que se ha aplicado el manual de usuario para la gestión de las recuperaciones. En cada caso, se desarrollan los pasos que componen el manual para obtener la alternativa de disposición más adecuada.

##### **14.4.1. Caso 1.**

- 1. Información que nos aporta el cliente sobre el sillón.** El sillón es devuelto en perfecto estado por un cliente particular, dentro del periodo de garantía de un mes, debido a que le ha llegado más tarde de lo pactado entre cliente y empresa. El sillón se encuentra en la provincia de Valencia, a unos 50 kilómetros aproximadamente.
- 2. Concretar las alternativas de disposición que no son viables para cada sillón en cuestión.** Puesto que el sillón se encuentra en perfecto estado, se descarta la alternativa de reacondicionamiento.
- 3. Calcular los valores de cada dimensión de sostenibilidad:**

El sillón puede ser recogido en un camión  $< 3'5$  t y podría ser vendido a un nuevo cliente que se encuentre a 70 km (provincia de Valencia), al mismo precio y entregado mediante el mismo tipo de transporte. Al mismo tiempo, existe la opción de rebajar el precio, un 20%, y venderlo en el mercado outlet a un cliente que se encuentra a 100 km (provincia de Alicante), también mediante el mismo transporte.

**a. Valores fijos:**

INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
$Srec_{i,1}$	ingresos por reciclaje del componente 1 (estructura) obtenido del producto i	-
$Srec_{i,2}$	ingresos por reciclaje del componente 2 (motor) obtenido del producto i	1'62
$Srec_{i,3}$	ingresos por reciclaje del componente 3 (tapizado) obtenido del producto i	108'00
COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
$CIS_i$	coste de inspección y clasificación del producto i	3'00
COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$COP_i$	coste de embalaje del producto i para reutilización o reventa	10'00
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
$CDIS_{i1}$	Coste de desensamblaje del componente 1 (estructura) del producto i	1'00
$CDIS_{i2}$	Coste de desensamblaje del componente 2 (motor) del producto i	9'00
$CDIS_{i3}$	Coste de desensamblaje del componente 3 (tapizado) del producto i	15'00
$CL_{i,j}$	coste de etiquetado del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización	-
$CS_{2i,j}$	coste de almacenaje del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización	-
$CT_{3i,j}$	coste de transporte del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización	3'00

PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
$EIP_{1i1}$	Impacto ambiental del desmontaje del componente 1 (estructura) del producto i	0'00006
$EIP_{1i2}$	Impacto ambiental del desmontaje del componente 2 (motor) del producto i	0'00054
$EIP_{1i3}$	Impacto ambiental del desmontaje del componente 3 (tapizado) del producto i	0'00089
$EIT_{3i1}$	impacto ambiental del transporte del componente 1 (estructura) del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje	0'00002
$EIT_{3i2}$	impacto ambiental del transporte del componente 2 (motor) del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje	0'00047
$EIT_{3i3}$	impacto ambiental del transporte del componente 3 (tapizado) del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje	0'00096
PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

<b>EIR<sub>i1</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 1 (estructura) del producto i	0'00012
<b>EIR<sub>i2</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 2 (motor) del producto i	0'00012
<b>EIR<sub>i3</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 3 (tapizado) del producto i	0'00012

<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>Wp1*μp1</b>	Horas de descarga del sillón en la empresa * factor regional (Valencia prov)	0'1653
<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>Wp2*μp2</b>	Horas para las tareas de puesta a punto del sillón * factor regional (Valencia prov)	0'1653
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Wp3*μp3</b>	Desmontaje del producto* factor regional (Valencia prov)	0'9900
<b>PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
<b>Wtcan*μtcan</b>	Transporte para Canibalización de componentes* factor regional (Valencia prov)	0'0825
<b>Wtrec*μtrec</b>	Transporte interior para Reciclaje de componentes * factor regional (Valencia prov)	0'0825
<b>Wprec1*μprec1</b>	Reciclaje de la estructura * factor regional (Valencia prov)	0'5775
<b>Wprec2*μprec2</b>	Reciclaje del motor * factor regional (Castellón prov)	0'8080
<b>Wprec3*μprec3</b>	Reciclaje del tapizado * factor regional (Alicante prov)	1'0500

Tabla 41. Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores fijos para el caso 1 de sillones de relax (Elaboración propia).

**b. Valores variables:**

<b>INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>Sreu<sub>i</sub></b>	ingresos por reutilización del producto i como nuevo	650'00
<b>Sout<sub>i</sub></b>	ingresos por reutilización del producto i en el mercado secundario	520'00
<b>Sref<sub>i</sub></b>	ingresos por reacondicionamiento del producto i	-
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Scan<sub>i,1</sub></b>	ingresos por canibalización del componente 1 (estructura) obtenido del producto i	131'56
<b>Scan<sub>i,2</sub></b>	ingresos por canibalización del componente 2 (motor) obtenido del producto i	116'30
<b>Scan<sub>i,3</sub></b>	ingresos por canibalización del componente 3 (tapizado) obtenido del producto i	158'83



PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
$CP_i$	coste de recuperación del producto $i$ desde el cliente	650'00
$CT_{1i}$	coste de transporte del producto $i$ desde el cliente hasta la empresa	10'00
COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$CS_{1i}$	coste de almacenaje del producto $i$ antes de la reutilización o reventa	0'30
$CT_{2i}$	coste de transporte del producto $i$ desde la empresa hasta el nuevo cliente	12'50
Costes específicos de cada alternativa de disposición		
$Cref_i$	coste de reacondicionamiento del producto $i$	-

PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
$EIT_{1i}$	impacto ambiental del transporte del producto $i$ desde el cliente hasta la empresa	0'00094
PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$EIT_{2Ai}$	impacto ambiental del transporte del producto $i$ desde la empresa hasta el nuevo cliente de mercado primario	0'00132
$EIT_{2Bi}$	impacto ambiental del transporte del producto $i$ desde la empresa hasta el nuevo cliente de mercado secundario tipo outlet	0'00188
PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
$EIP_{2i}$	impacto ambiental de reacondicionamiento del producto $i$	no

PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
$Wt1*\mu t1$	Horas de recogida del producto del cliente * factor regional (Valencia prov)	0'9900
PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$Wt2a*\mu t2a$	Horas de entrega del producto al cliente de reutilización * factor regional (Valencia prov)	0'9900
$Wt2b*\mu t2b$	Horas de entrega del producto al cliente de outlet* factor regional (Valencia com)	1'5300
PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
$Wpreu*\mu preu$	Reacondicionamiento del producto * factor regional (Valencia prov)	no

Tabla 42. Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores variables para el caso 1 de sillones de relax (Elaboración propia).

**4. Obtener la alternativa de disposición más adecuada mediante la ejecución del subproceso de solución.**

	ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN									Wj Econom.	Wj Ambiental	Wj Social.	DPIP
	REU	OUT	REF	CAN			REC			0,6	0,3	0,1	
Solución 1	1	-	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,15	0,05	0,20
Solución 2	0	1,00	0	0	0	0	0	0	0	2,18	0,27	0,04	2,48
Solución 3	0	-	1	0	0	0	0	0	0	10,89	0,15	0,10	11,15
Solución 4	0	-	0	1	1	1	0	0	0	4,27	0,00	0,05	4,31
Solución 5	0	-	0	1	1	0	0	0	1	5,12	0,22	0,03	5,36
Solución 6	0	-	0	1	0	1	0	1	0	6,19	0,12	0,03	6,34
Solución 7	0	-	0	1	0	0	0	1	1	7,04	0,34	0,01	7,39
Solución 8	0	-	0	0	1	1	1	0	0	6,47	0,03	0,04	6,53
Solución 9	0	-	0	0	1	0	1	0	1	7,32	0,24	0,02	7,58
Solución 10	0	-	0	0	0	1	1	1	0	8,39	0,15	0,02	8,56
Solución 11	0	-	0	0	0	0	1	1	1	9,24	0,36	0,00	9,61

**Tabla 43.** Valores de DPIP para cada posible solución del caso 1 de sillones de relax (Elaboración propia).

Sin lugar a duda, la alternativa de disposición más adecuada es la reutilización del sillón vendiéndolo de nuevo en el mercado primario (Solución 1).

**14.4.2. Caso 2.**

**1. Información que nos aporta el cliente sobre el sillón.** El sillón es recuperado tras estar expuesto en una tienda durante seis meses. Aunque el sillón se encuentra en perfecto estado de funcionamiento, el tapizado está un poco desgastado debido al uso de todo este tiempo. El sillón se encuentra a 20 km, dentro de la provincia de Valencia.

No hay que indemnizar al cliente porque el sillón ha sido prestado por la empresa para poder promocionarlo durante este tiempo en la tienda del cliente.

**2. Concretar las alternativas de disposición que no son viables para cada sillón en cuestión.** Puesto que el sillón no se encuentra en perfecto estado, se descarta la alternativa de reutilización del producto como nuevo. Al mismo tiempo, puesto que el tapizado se encuentra un poco desgastado, no se considera la canibalización de este componente y sus ingresos por reciclaje se reducen respecto al ejemplo general.

**3. Calcular los valores de cada dimensión de sostenibilidad:**

El sillón puede ser recogido en un camión < 3'5 t y existe la opción de rebajar el precio, un 35%, y venderlo en el mercado outlet a un cliente que se encuentra a 100 km (provincia de Alicante), siendo entregado mediante el mismo tipo de transporte.

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

Al mismo tiempo, el sillón podría reacondicionarse (cambiando el tapizado) y ser vendido, con su precio original, a un nuevo cliente que se encuentre a 80 km (provincia de Valencia) y entregado mediante el mismo tipo de transporte.

a. Valores fijos:

INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Srec<sub>i,1</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 1 (estructura) obtenido del producto i	-
<b>Srec<sub>i,2</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 2 (motor) obtenido del producto i	1'62
<b>Srec<sub>i,3</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 3 (tapizado) obtenido del producto i	65'00
COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
<b>CIS<sub>i</sub></b>	coste de inspección y clasificación del producto i	3'00
COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>COP<sub>i</sub></b>	coste de embalaje del producto i para reutilización o reventa	10'00
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>CDIS<sub>i1</sub></b>	Coste de desensamblaje del componente 1 (estructura) del producto i	1'00
<b>CDIS<sub>i2</sub></b>	Coste de desensamblaje del componente 2 (motor) del producto i	9'00
<b>CDIS<sub>i3</sub></b>	Coste de desensamblaje del componente 3 (tapizado) del producto i	15'00
<b>CL<sub>i,j</sub></b>	coste de etiquetado del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización	-
<b>CS<sub>2i,j</sub></b>	coste de almacenaje del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización	-
<b>CT<sub>3i,j</sub></b>	coste de transporte del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización	3'00

PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>EIP1<sub>i1</sub></b>	Impacto ambiental del desmontaje del componente 1 (estructura) del producto i	0'00006
<b>EIP1<sub>i2</sub></b>	Impacto ambiental del desmontaje del componente 2 (motor) del producto i	0'00054
<b>EIP1<sub>i3</sub></b>	Impacto ambiental del desmontaje del componente 3 (tapizado) del producto i	0'00089
<b>EIT3<sub>i1</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 1 (estructura) del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje	0'00002
<b>EIT3<sub>i2</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 2 (motor) del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje	0'00047

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

EIT <sub>3i3</sub>	impacto ambiental del transporte del componente 3 (tapizado) del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje	0'00096
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
EIR <sub>1i</sub>	impacto ambiental de reciclaje del componente 1 (estructura) del producto i	0'00012
EIR <sub>2i</sub>	impacto ambiental de reciclaje del componente 2 (motor) del producto i	0'00012
EIR <sub>3i</sub>	impacto ambiental de reciclaje del componente 3 (tapizado) del producto i	0'00012

<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
Wp <sub>1</sub> *μp <sub>1</sub>	Horas de descarga del sillón en la empresa * factor regional (Valencia prov)	0'1653
<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
Wp <sub>2</sub> *μp <sub>2</sub>	Horas para las tareas de puesta a punto del sillón * factor regional (Valencia prov)	0'1653
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
Wp <sub>3</sub> *μp <sub>3</sub>	Desmontaje del producto* factor regional (Valencia prov)	0'9900
<b>PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
Wtcan*μtcan	Transporte para Canibalización de componentes* factor regional (Valencia prov)	0'0825
Wtrec*μtrec	Transporte interior para Reciclaje de componentes * factor regional (Valencia prov)	0'0825
Wprec <sub>1</sub> *μprec <sub>1</sub>	Reciclaje de la estructura * factor regional (Valencia prov)	0'5775
Wprec <sub>2</sub> *μprec <sub>2</sub>	Reciclaje del motor * factor regional (Castellón prov)	0'8080
Wprec <sub>3</sub> *μprec <sub>3</sub>	Reciclaje del tapizado * factor regional (alicante prov)	1'0500

Tabla 44. Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores fijos para el caso 2 de sillones de relax (Elaboración propia).

**b. Valores variables:**

<b>INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
Sreu <sub>i</sub>	ingresos por reutilización del producto i como nuevo	-
Sout <sub>i</sub>	ingresos por reutilización del producto i en el mercado secundario	422'50
Sref <sub>i</sub>	ingresos por reacondicionamiento del producto i	650'00
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

<b>Scan<sub>i,1</sub></b>	ingresos por canibalización del componente 1 (estructura) obtenido del producto i	131'56
<b>Scan<sub>i,2</sub></b>	ingresos por canibalización del componente 2 (motor) obtenido del producto i	116'30
<b>Scan<sub>i,3</sub></b>	ingresos por canibalización del componente 3 (tapizado) obtenido del producto i	-
<b>COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>CP<sub>i</sub></b>	coste de recuperación del producto i desde el cliente	-
<b>CT<sub>1i</sub></b>	coste de transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	10'00
<b>COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>CS<sub>1i</sub></b>	coste de almacenaje del producto i antes de la reutilización o reventa	0'30
<b>CT<sub>2i</sub></b>	coste de transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente	12'50
Costes específicos de cada alternativa de disposición		
<b>Cref<sub>i</sub></b>	coste de reacondicionamiento del producto i	168'83

<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>EIT<sub>1i</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	0'00038
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>EIT<sub>2Ai</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente de mercado primario	0'00150
<b>EIT<sub>2Bi</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente de mercado secundario tipo outlet	0'00188
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
<b>EIP<sub>2i</sub></b>	impacto ambiental de reacondicionamiento del producto i	0'00050

<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>Wt1*<math>\mu</math>t1</b>	Horas de recogida del producto del cliente * factor regional (Valencia prov)	0'9900
<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>Wt2a*<math>\mu</math>t2a</b>	Horas de entrega del producto al cliente de reutilización * factor regional (Valencia prov)	0'9900
<b>Wt2b*<math>\mu</math>t2b</b>	Horas de entrega del producto al cliente de outlet* factor regional (Valencia com)	1'5000
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		

<b>Wpreu*µpreu</b>	Reacondicionamiento del producto * factor regional (Valencia prov)	0'3297
--------------------	--	--------

**Tabla 45.** Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores variables para el caso 2 de sillones de relax (Elaboración propia).

#### 4. Obtener la alternativa de disposición más adecuada mediante la ejecución del subproceso de solución.

	ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN									Wj Econom.	Wj Ambiental	Wj Social.	DPIP
	REU	OUT	REF	CAN			REC			0,6	0,3	0,1	
Solución 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,65	0,08	0,05	0,78
Solución 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0,15	0,04	0,28
Solución 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,00	0,18	0,07	0,25
Solución 4	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0,33	0,00	0,05	0,38
Solución 5	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0,24	0,22	0,03	0,49
Solución 6	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0,48	0,12	0,03	0,63
Solución 7	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0,40	0,34	0,01	0,74
Solución 8	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0,51	0,03	0,04	0,57
Solución 9	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0,42	0,24	0,02	0,68
Solución 10	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0,66	0,15	0,02	0,83
Solución 11	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0,57	0,36	0,00	0,94

**Tabla 46.** Valores de DPIP para cada posible solución del caso 2 de sillones de relax (Elaboración propia).

Por una pequeña diferencia en el DPIP, la alternativa de disposición más adecuada es el reacondicionamiento del sillón (Solución 3), interviniendo sobre él y vendiéndolo, de nuevo, en el mercado primario.

#### 14.4.3. Caso 3.

- 1. Información que nos aporta el cliente sobre el sillón.** El sillón es recuperado tras una feria del mueble, donde la empresa ha asistido a presentar sus modelos. El producto no se encuentra en perfecto estado, debido a que el motor no funciona correctamente y el tapizado debe ser tratado con un producto especial para limpiarlo. El sillón se encuentra en la provincia de Barcelona, junto con otros cinco modelos de la empresa.
- 2. Concretar las alternativas de disposición que no son viables para cada sillón en cuestión.** Puesto que el sillón no se encuentra en perfecto estado, se descarta la alternativa de reutilización del producto como nuevo y su venta como producto en el mercado outlet. Al mismo tiempo, puesto que el motor no funciona correctamente se descarta su canibalización. Además, debido a que el tapizado no se encuentra perfectamente, se reduce su posible ingreso por canibalización y por reciclaje.

**3. Calcular los valores de cada dimensión de sostenibilidad:**

El sillón puede ser recogido en un camión de gran tonelaje y transportado durante 300 km. Los 50 km restantes son realizados mediante un camión < 3'5 t. El sillón podría reacondicionarse (cambiando el motor y limpiando el tapizado) y ser vendido, con su precio original, a un nuevo cliente que se encuentre a 30 km (provincia de Valencia) y entregado mediante un camión < 3'5 t.

**a. Valores fijos:**

INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Srec<sub>i,1</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 1 (estructura) obtenido del producto i	-
<b>Srec<sub>i,2</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 2 (motor) obtenido del producto i	1'62
<b>Srec<sub>i,3</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 3 (tapizado) obtenido del producto i	25'00
COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
<b>CIS<sub>i</sub></b>	coste de inspección y clasificación del producto i	3'00
COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>COP<sub>i</sub></b>	coste de embalaje del producto i para reutilización o reventa	10'00
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>CDIS<sub>i1</sub></b>	Coste de desensamblaje del componente 1 (estructura) del producto i	1'00
<b>CDIS<sub>i2</sub></b>	Coste de desensamblaje del componente 2 (motor) del producto i	9'00
<b>CDIS<sub>i3</sub></b>	Coste de desensamblaje del componente 3 (tapizado) del producto i	15'00
<b>CL<sub>i,j</sub></b>	coste de etiquetado del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización	-
<b>CS<sub>2i,j</sub></b>	coste de almacenaje del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización	-
<b>CT<sub>3i,j</sub></b>	coste de transporte del componente j del producto i después de ser desensamblado para reciclaje o canibalización	3'00

PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>EIP<sub>1,1</sub></b>	Impacto ambiental del desmontaje del componente 1 (estructura) del producto i	0'00006
<b>EIP<sub>1,2</sub></b>	Impacto ambiental del desmontaje del componente 2 (motor) del producto i	0'00054

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

EIP <sub>1i3</sub>	Impacto ambiental del desmontaje del componente 3 (tapizado) del producto i	0'00089
EIT <sub>3i1</sub>	impacto ambiental del transporte del componente 1 (estructura) del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje	0'00002
EIT <sub>3i2</sub>	impacto ambiental del transporte del componente 2 (motor) del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje	0'00047
EIT <sub>3i3</sub>	impacto ambiental del transporte del componente 3 (tapizado) del producto i desde el centro de decisión hasta el centro de reciclaje	0'00096
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
EIR <sub>i1</sub>	impacto ambiental de reciclaje del componente 1 (estructura) del producto i	0'00012
EIR <sub>i2</sub>	impacto ambiental de reciclaje del componente 2 (motor) del producto i	0'00012
EIR <sub>i3</sub>	impacto ambiental de reciclaje del componente 3 (tapizado) del producto i	0'00012

<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
Wp <sub>1</sub> *μp <sub>1</sub>	Horas de descarga del sillón en la empresa * factor regional (Valencia provincia)	0'1653
<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
Wp <sub>2</sub> *μp <sub>2</sub>	Horas para las tareas de puesta a punto del sillón * factor regional (Valencia provincia)	0'1653
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
Wp <sub>3</sub> *μp <sub>3</sub>	Desmontaje del producto* factor regional (Valencia provincia)	0'9900
<b>PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
Wtcan*μtcan	Transporte para Canibalización de componentes* factor regional (Valencia provincia)	0'0825
Wtrec*μtrec	Transporte interior para Reciclaje de componentes * factor regional (Valencia provincia)	0'0825
Wprec <sub>1</sub> *μprec <sub>1</sub>	Reciclaje de la estructura * factor regional (Valencia provincia)	0'5775
Wprec <sub>2</sub> *μprec <sub>2</sub>	Reciclaje del motor * factor regional (Castellón provincia)	0'8080
Wprec <sub>3</sub> *μprec <sub>3</sub>	Reciclaje del tapizado * factor regional (Alicante provincia)	1'0500

Tabla 47. Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores fijos para el caso 3 de sillones de relax (Elaboración propia).

**b. Valores variables:**

<b>INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
Sreu <sub>i</sub>	ingresos por reutilización del producto i como nuevo	-
Sout <sub>i</sub>	ingresos por reutilización del producto i en el mercado secundario	-



PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

<b>Sref<sub>i</sub></b>	ingresos por reacondicionamiento del producto i	650'00
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Scan<sub>i,1</sub></b>	ingresos por canibalización del componente 1 (estructura) obtenido del producto i	131'56
<b>Scan<sub>i,2</sub></b>	ingresos por canibalización del componente 2 (motor) obtenido del producto i	-
<b>Scan<sub>i,3</sub></b>	ingresos por canibalización del componente 3 (tapizado) obtenido del producto i	45'00
<b>COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>CP<sub>i</sub></b>	coste de recuperación del producto i desde el cliente	-
<b>CT<sub>1i</sub></b>	coste de transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	15'00
<b>COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>CS<sub>1i</sub></b>	coste de almacenaje del producto i antes de la reutilización o reventa	1'00
<b>CT<sub>2i</sub></b>	coste de transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente	15'00
Costes específicos de cada alternativa de disposición		
<b>Cref<sub>i</sub></b>	coste de reacondicionamiento del producto i	156'30

<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>EIT<sub>1i</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	0'00336
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>EIT<sub>2Ai</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente de mercado primario	0'00038
<b>EIT<sub>2Bi</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente de mercado secundario tipo outlet	-
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
<b>EIP<sub>2i</sub></b>	impacto ambiental de reacondicionamiento del producto i	0'00050

<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>Wt1*<math>\mu</math>t1</b>	Horas de recogida del producto del cliente * factor regional (media nacional)	0'8333
<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>Wt2a*<math>\mu</math>t2a</b>	Horas de entrega del producto al cliente de reutilización * factor regional (Valencia provincia)	0'5100
<b>Wt2b*<math>\mu</math>t2b</b>	Horas de entrega del producto al cliente de outlet* factor regional (Valencia comunidad)	-

Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
Wpreu*μpreu	Reacondicionamiento del producto * factor regional (Valencia provincia)	0'3297

Tabla 48. Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores variables para el caso 3 de sillones de relax (Elaboración propia).

#### 4. Obtener la alternativa de disposición más adecuada mediante la ejecución del subproceso de solución.

	ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN									Wj Econom.	Wj Ambiental	Wj Social.	DPIP
	REU	OUT	REF	CAN			REC			0,6	0,3	0,1	
Solución 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,66	0,45	0,06	1,17
Solución 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,66	0,38	0,07	1,10
Solución 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,00	0,55	0,05	0,61
Solución 4	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0,47	0,00	0,05	0,52
Solución 5	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0,48	0,22	0,03	0,73
Solución 6	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0,47	0,12	0,03	0,62
Solución 7	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0,48	0,34	0,01	0,83
Solución 8	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0,65	0,03	0,04	0,71
Solución 9	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0,66	0,24	0,02	0,92
Solución 10	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0,65	0,15	0,02	0,82
Solución 11	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0,65	0,36	0,00	1,02

Tabla 49. Valores de DPIP para cada posible solución del caso 3 de sillones de relax (Elaboración propia).

En este caso, la herramienta indica como alternativa de solución más adecuada la canibalización de los tres componentes (solución 4). No obstante, debido a que el motor no se puede canibalizar, dicha solución no es factible, por tanto, la alternativa más adecuada será el reacondicionamiento del sillón (solución 3).

### 14.5. Resultados

A continuación, se van a examinar los resultados obtenidos en la utilización de la herramienta matemática en los tres casos de recuperación de productos explicados en los apartados anteriores. Con el objetivo de que el análisis sea lo más completo y útil posible, se van a seguir dos enfoques distintos pero complementarios. En primer lugar, se realiza un análisis de los resultados propiamente dichos, obtenidos con la aplicación de la herramienta matemática a los tres ejemplos comentados de recuperación de productos, comparando la decisión obtenida en cada caso con la herramienta respecto a la decisión que se hubiera tomado por la empresa según su política fija de decisión. En segundo lugar,

se realiza un análisis de sensibilidad, demostrando cómo cambia la elección de la alternativa de disposición más sostenible según varían los valores de los parámetros.

### 14.5.1. Análisis de resultados

En cada uno de los tres casos de ejemplo del apartado anterior, se ha aplicado la herramienta para obtener la alternativa de disposición más adecuada. Como se ha podido comprobar, en función de la información que aporta el cliente para cada situación, junto con la información que maneja la empresa respecto a las operaciones relacionadas con el producto, se obtienen los valores correspondientes a los parámetros de la herramienta y, con ellos, se ejecuta el subproceso de solución para obtener la alternativa de solución. El resumen de los resultados obtenidos para los casos anteriores se expone a continuación:

	DPIP Caso 1	DPIP Caso 2	DPIP Caso 3
Solución 1	0,20	0,78	1,17
Solución 2	2,48	0,28	1,10
Solución 3	11,15	0,25	0,61
Solución 4	4,31	0,38	0,52
Solución 5	5,36	0,49	0,73
Solución 6	6,34	0,63	0,62
Solución 7	7,39	0,74	0,83
Solución 8	6,53	0,57	0,71
Solución 9	7,58	0,68	0,92
Solución 10	8,56	0,83	0,82
Solución 11	9,61	0,94	1,02

**Tabla 50.** Valores del grado de aproximación al punto ideal (DPIP) para cada posible solución de los casos de sillones de relax (Elaboración propia).

Obviamente, los resultados de los tres casos demuestran cómo la herramienta varía en la elección de la alternativa más adecuada, en función de los valores de cada situación. En el caso 1, no existe lugar a dudas de que la reutilización (solución 1) es la alternativa más adecuada. En cambio, tanto en el caso 2 como en el caso 3, se observa que las diferencias entre las alternativas de solución son menores. Por ejemplo, en el caso 2, la solución 3 (reacondicionamiento), con un DPIP de 0,25, se encuentra muy cercana a la solución 2 (outlet), con un DPIP de 0,28. Asimismo, en el caso 3, la solución 3 (reacondicionamiento), con un DPIP de 0,61, se encuentra muy próxima a la solución 6 (canibalizar comp1 y comp3 y reciclar comp2), con un DPIP de 0,62.

La política de decisión fija actual de la empresa (apartado 14.1), establece la reutilización si el producto se encuentra en perfecto estado. En caso de no estar en perfecto estado, la empresa establece la venta en el mercado outlet si, pese a no estar en perfecto estado, aún se puede usar sin problemas y el aprovechamiento de los componentes si el sillón ya no puede venderse.

Tomando como referencia dicha política actual, la empresa escogería la reutilización en el primer caso, el outlet en el segundo caso y el aprovechamiento de los componentes en el tercer caso. Comparando las soluciones para cada caso según la política actual de la empresa y el resultado de utilizar la herramienta matemática (Tabla 51), se puede apreciar que la herramienta coincide en la selección de la alternativa de solución más sostenible para el caso 1. En cambio, para los casos 2 y 3, la herramienta de solución determina alternativas diferentes a las que elegiría la empresa según la política actual.

	Política Fija Actual		Herramienta de solución	
	Alternativa escogida	Valor DPIP	Alternativa escogida	Valor DPIP
<b>Caso 1</b>	Reutilización (Solución 1)	0'2	Reutilización (Solución 1)	0'2
<b>Caso 2</b>	Outlet (Solución 2)	0'28	Reacondicionamiento (Solución 3)	0'25
<b>Caso 3</b>	Reciclaje Comp2 y Canibalización Comp1 y Comp3 (Solución 6)	0'62	Reacondicionamiento (Solución 3)	0'52

**Tabla 51.** Alternativas de solución determinadas según la política fija previa y la herramienta de solución para los tres casos de sillones de relax (Elaboración propia).

Como se puede apreciar en la tabla anterior (Tabla 51), la herramienta matemática escoge alternativas con menor DPIP respecto a las escogidas siguiendo una política de decisión fija, consiguiendo así que la empresa sea más sostenible. De este modo, se demuestra que la herramienta desarrollada permite tomar decisiones que ayudan en el cambio de modelo de negocio actual hacia modelos más sostenibles.

#### 14.5.2. Análisis de sensibilidad

Los resultados obtenidos con la herramienta matemática diseñada demuestran que la elección de la alternativa más adecuada depende los valores de los parámetros en cada situación concreta, debido a que pequeñas variaciones en los valores pueden causar cambios en la alternativa prioritaria. Por tanto, será determinante llevar en todo momento el control sobre el valor de los parámetros y su evolución, debiéndose gestionar adecuadamente por parte de los decisores.

Dado que existe una gran interdependencia entre los valores utilizados y la decisión sobre la alternativa de disposición más sostenible, podría ser interesante conocer el rango de valores para cada parámetro clave que justificaría cada decisión. Por ejemplo, si el coste de reacondicionamiento es muy elevado, seguramente será más interesante vender el producto en el mercado secundario outlet que intervenir en él. En cambio, si el coste de reacondicionamiento es bajo, puede resultar más conveniente reacondicionarlo antes de venderlo en el mercado outlet. Por tanto, sería interesante saber a partir de que valor del coste de reacondicionamiento sería más interesante intervenir que venderlo directamente en el mercado secundario outlet.

Dicho de otra forma, ¿hasta qué valor podría incrementarse el coste de reacondicionamiento para que la decisión más adecuada del producto fuese el reacondicionamiento y no cambiase? Para atender este tipo de cuestiones, podría ser interesante realizar un análisis de sensibilidad respecto aquellos valores que más pueden variar en función de cada sillón recuperado.

Pero habría muchos posibles análisis de sensibilidad, tantos como valores variables (ingresos por el producto en el mercado primario o secundario, ingresos por canibalización o reciclaje de componentes, costes de recuperación, costes de transporte, costes de almacenaje, costes de reacondicionamiento, impacto ambiental de transportes, impacto ambiental de operaciones de intervención, tiempos de transportes, tiempos de operaciones, factores regionales, ...). En este apartado, se realizará un análisis de sensibilidad sobre el coste específico de reacondicionamiento (*Cref*) y sobre el ingreso por venta en mercado secundario outlet (*Sout*) por considerarse los valores variables más representativos para la determinación de la alternativa en función del estado del producto.

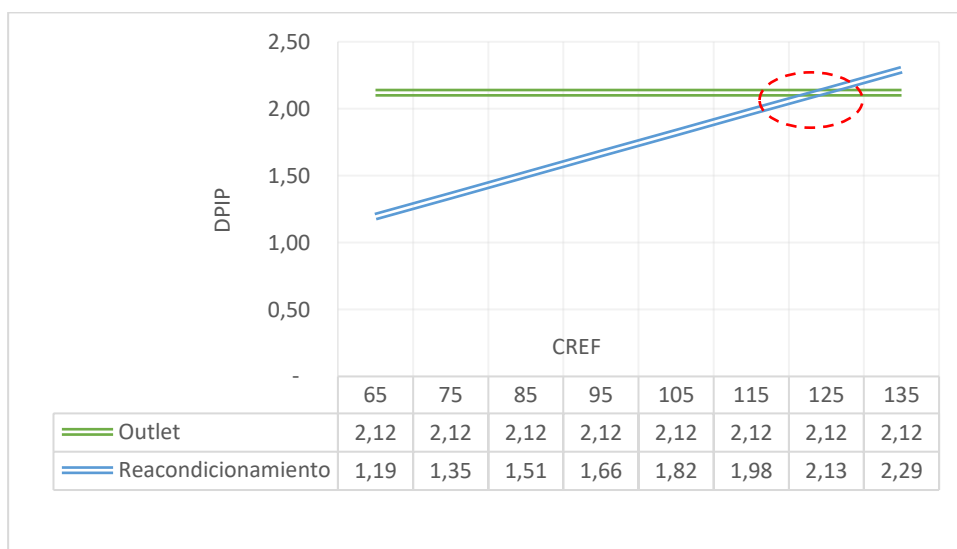
A continuación, se realizarán dos simulaciones para analizar cómo puede cambiar la alternativa prioritaria en función de la variación de los valores del coste específico de reacondicionamiento (*Cref*) y del ingreso por venta en el mercado secundario tipo outlet (*Sout*). En base a estas dos simulaciones se puede observar cómo la variación de los valores correspondientes al coste del reacondicionamiento y el precio de venta en el mercado secundario outlet hacen fluctuar la decisión más adecuada de una alternativa a otra.

**14.5.2.1. Coste específico de reacondicionamiento del producto (*Cref*)**

El coste específico de reacondicionamiento (*Cref*) dependerá del estado en el que se encuentre el sillón que va a ser intervenido. En el ejemplo de aplicación genérico analizado, dicho coste es de 65 €. Desde el punto de vista de la elección de la alternativa más sostenible, si dicho coste aumenta, perjudica a la alternativa de reacondicionamiento, pero, si dicho coste se reduce le beneficia hasta ser elegida como prioritaria, considerando una ponderación no nula en el factor económico.

En la figura siguiente (Figura 261), se muestra una gráfica donde el eje de abscisas contiene valores del coste de reacondicionamiento (*Cref*), desde 65 € a 135 €, y el eje de ordenadas indica valores del DPIP, desde el valor 0 al 2'5. Se representa mediante una línea verde la evolución del DPIP de la alternativa Outlet, y mediante una línea azul, la evolución del DPIP de la alternativa Reacondicionamiento, en función del valor del coste de reacondicionamiento (*Cref*), sin modificar el resto de los parámetros. Partiendo del valor actual (*Cref* = 65 €) se observa que, según aumenta dicho valor, el DPIP de la alternativa de reacondicionamiento va subiendo de manera proporcional (línea azul de la figura), alejándose cada vez más del punto ideal. Esto significa que, según cuesta más dinero el reacondicionamiento del producto, la alternativa de reacondicionamiento se va alejando del punto ideal.

Debido a que el resto de los valores no son modificados, el DPIP de la alternativa de outlet (línea verde) permanece constante frente a este cambio.



**Figura 261.** Evolución del valor DPIP para las alternativas de outlet y reacondicionamiento según valores de Cref (Elaboración propia)

Lógicamente, a medida que aumenta el valor de *Cref*, el DPIP de la alternativa de reacondicionamiento va aumentando hasta llegar a un punto en el que se iguala al valor DPIP de la alternativa outlet, marcado con un círculo rojo discontinuo. Esto significa que, justo en este caso ( $Cref = 125$ ), las dos alternativas serían equivalentes, dando el mismo resultado de DPIP. Sin embargo, para cualquier valor de *Cref* superior a 125 €, la alternativa más adecuada sería vender el producto en un mercado secundario tipo outlet, en vez del reacondicionamiento del producto, es decir este valor de *Cref* marcará que, para un valor superior interesa outlet y para un valor inferior interesa el reacondicionamiento.

En la siguiente figura (Figura 262), se resumen los umbrales de las alternativas más sostenibles en función de la variación del *Cref*:

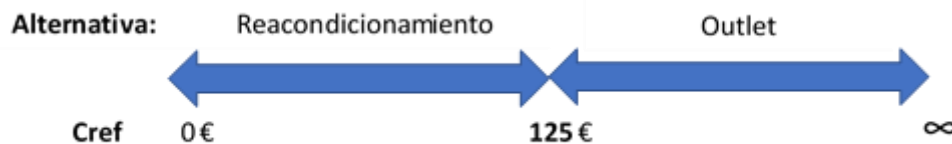


Figura 262. Umbrales de las alternativas más adecuadas en función del valor de *Cref* (Elaboración Propia)

#### 14.5.2.2. Ingreso por venta del producto en el mercado secundario (*Sout*)

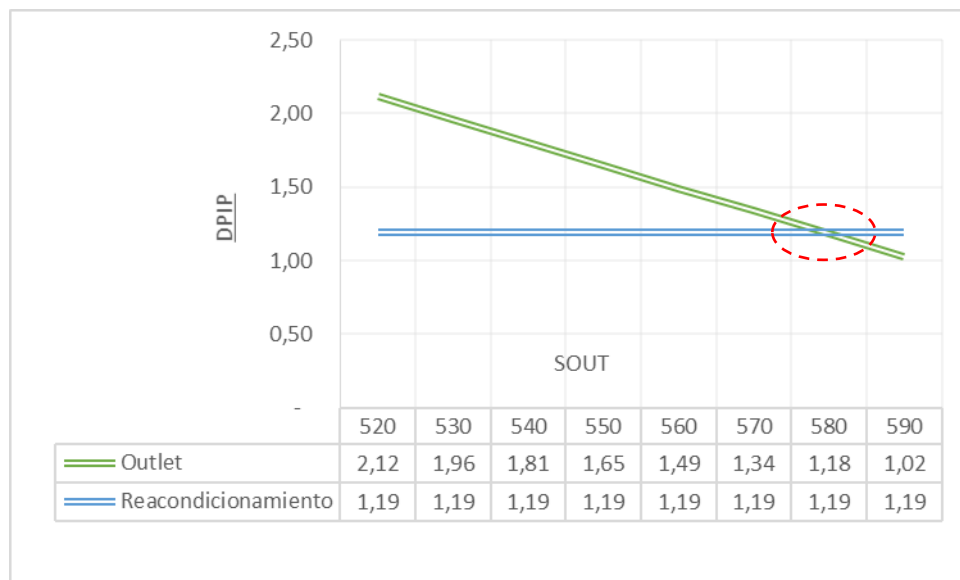
Otro parámetro que tiene gran influencia sobre la elección de la alternativa más idónea y puede sufrir variaciones según cada producto, mostrando además una posible influencia de la demanda, es el ingreso por venta en el mercado secundario tipo outlet (*Sout*). En el ejemplo tipo analizado en este capítulo, se muestra como mejor alternativa, para el caso que no pueda reutilizar/revenderse directamente, el **reacondicionamiento del producto**. El valor actual del ingreso outlet (*Sout*) es de 520 €, por tanto, en el caso que ese precio fuese inferior, y manteniendo constantes el resto de los valores, continuaría siendo el reacondicionamiento la alternativa prioritaria. En cambio, si dichos ingresos fuesen mayores, llegaría un punto a partir del cual sería más conveniente vender el sillón en un mercado secundario que reacondicionarlo.

En la imagen que se muestra a continuación (Figura 263) se muestra una gráfica donde el eje de abscisas contiene valores del ingreso del producto en el mercado secundario outlet (*Sout*), desde 520 € a 590 €, y el eje de ordenadas indica valores del DPIP, desde el valor 0 al 2'5. Igual que en el apartado anterior, se representa mediante una línea verde la

evolución del DPIIP de la alternativa Outlet, y mediante una línea azul, la evolución del DPIIP de la alternativa Reacondicionamiento, en función del valor del ingreso del producto en el mercado secundario outlet (*Sout*), sin modificar el resto de los parámetros.

Partiendo del valor actual (*Sout* = 520 €) se observa que, según aumenta dicho valor, el DPIIP de la alternativa outlet va bajando de manera proporcional (línea verde de la figura), acercándose cada vez más del punto ideal. Esto significa que, según se ingresa más dinero con la venta del sillón en el mercado outlet, la alternativa de outlet se va acercando al punto ideal.

Debido a que el resto de los valores no son modificados, el DPIIP de la alternativa de reacondicionamiento (línea azul) permanece constante frente a este cambio.



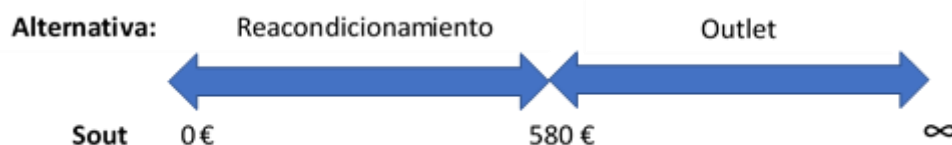
**Figura 263.** Evolución del valor DPIIP para las alternativas de outlet y reacondicionamiento según valores de *Sout* (Elaboración propia)

Lógicamente, a medida que aumenta el valor de *Sout*, el DPIIP de la alternativa de outlet se va reduciendo hasta llegar a un punto de equilibrio en el que se iguala al valor DPIIP de la alternativa de reacondicionamiento, marcado con un círculo rojo discontinuo. Esto significa que, justo en este caso (*Sout* = 580), las dos alternativas serían equivalentes, dando el mismo resultado de DPIIP. Sin embargo, para cualquier valor de *Sout* superior a 580 €, la alternativa más adecuada sería vender el producto en un mercado secundario tipo outlet, en vez del reacondicionamiento del producto, es decir este valor de *Sout*



marcará que, para un valor superior interesa outlet y para un valor inferior interesa el reacondicionamiento.

En la siguiente figura (Figura 264), se resumen los umbrales de las alternativas más sostenibles en función de la variación del Sout:



**Figura 264.** Umbrales de las alternativas más adecuadas en función del valor de Sout (Elaboración Propia)

## 14.6. Conclusiones

Cuando un sillón retorna a las instalaciones de la empresa, la primera intención de esta será reintroducirlo de nuevo en el mercado, lo más pronto posible, al precio más cercano con respecto a su precio original y con la mínima intervención, siendo la reutilización la alternativa más adecuada desde todos los puntos de vista, tal y como se ha comprobado en el presente capítulo.

Sobre la DD convergen una gran cantidad de aspectos que convierten las operaciones de inspección y determinación de la alternativa más adecuada en operaciones fundamentales del PLI. Dando la importancia que se merece dicha decisión, y ante la necesidad de considerar una gran cantidad de variantes, resulta esencial formalizar el PLI y mejorar la elección de la alternativa más adecuada siendo, el Marco de Referencia propuesto, una herramienta de ayuda para ello.

Como se ha podido comprobar en apartados anteriores, la DD es una decisión dinámica, pues los valores referentes a cada parámetro varían en función de las características de cada producto y, con ello, pueden modificar la alternativa prioritaria.

Las características de los sillones de relax, que no dependen únicamente de la empresa y que son especialmente sensibles y determinantes para la modificación de la alternativa más adecuada serán aquellas que, dadas las características del producto, tengan más influencia sobre los aspectos económicos, ambientales y sociales, y varíen entre los distintos productos.

Dichas características se detallan en los siguientes puntos:

- **Variaciones en los precios de venta, tanto en el mercado primario como en el mercado secundario.**

Ante variaciones en los precios de venta, se puede decantar la balanza hacia una alternativa u otra, tal y como se ha apreciado en apartados anteriores. Un aumento en el precio de venta de los sillones en el mercado primario o secundario aumentará la rentabilidad económica de la alternativa de reutilización, bien en el mercado primario o bien en el mercado secundario.

Por tanto, será esencial conocer el precio de cada producto para determinar la mejor alternativa.

- **Variaciones en los precios de venta para el reciclaje de componentes.**

Poder conocer y negociar mejores precios de venta para el reciclaje de componentes, puede convertir a la alternativa de reciclaje en una alternativa mucho más interesante en aquellos casos en los que el sistema se decante por aprovechar los componentes. De este modo, conseguir un mayor precio de venta del componente puede convertir la alternativa de reciclaje como prioritaria.

- **Variaciones en el grado de imperfección del producto recuperado.**

Según el estado en el que se encuentre el producto recuperado, hará falta una intervención u otra para poder ponerlo de nuevo en el mercado. Es evidente que, a mayor grado de imperfección, se precisará mayor intervención, incurriendo ello en mayores costes de reacondicionamiento (mayor coste económico), mayor consumo energético (mayor impacto ambiental) y mayor tiempo de intervención (mayor impacto social). Por tanto, resultará esencial conocer las características del sistema para que, en función del grado de intervención necesaria, determinar cuanto antes la mejor alternativa, al igual que se he realizado en el apartado anterior (Apartado 14.4).

En el presente capítulo, se ha visto que la aplicación de la herramienta ayuda a seguir una política de decisión dinámica, que aconseja alternativas de solución distintas en función

del estado del producto y del resto de información, respecto a la política de decisión fija que se sigue actualmente en la empresa.

Según esta política fija, difícilmente se contempla el reacondicionamiento del sillón para poder venderlo a un precio mayor. Dicha circunstancia se debe generalmente a la falta de tiempo, que se convierte en falta de control sobre la información referente a las alternativas de disposición, y porque es algo que molesta en la fábrica (de hecho, no tenían ni un lugar asignado para ello).

En este sentido, si tuviesen más controladas y estandarizadas las principales operaciones de intervención sobre los productos recuperados, se podría valorar previamente el impacto económico, ambiental y social de cada una de ellas y, en base a ello, la aplicación del MR les podría ayudar a adoptar la decisión más adecuada para cada producto.

En conclusión, ante la necesidad de inspección individual de cada sillón recuperado para identificar, tanto su estado, como la ausencia de cualquier anomalía, y siendo conscientes de la variedad de situaciones en las que se puede encontrar el sillón, resulta muy conveniente contar con herramientas de ayuda a la toma de decisión para escoger la mejor disposición de cada producto.

Por tanto, el uso del Marco de Referencia puede resultar de gran utilidad para determinar la mejor alternativa de disposición en cada caso, consiguiendo así transformar la política fija de decisión en una política dinámica que, sin demasiados esfuerzos, pueda garantizar decisiones más sostenibles.

## **14.7. Referencias**

- Erasmus + Programme of the European union. (2018). Circular Economy in the Furniture Industry : Overview of Current Challenges and competences needs, 1–51.
- Forrest, A., Hilton, M., Ballinger, A., & Whittaker, D. (2017). Circular Economy Opportunities in the Furniture Sector. *European Environmental Bureau (EEB)*, 55. Retrieved from file:///C:/Users/giuli/Desktop/Circular-Economy-in-the-Furniture-Sector.pdf

## **14.8. Anexos**

### **14.8.1. Anexo. Modelo Matemático de aspectos económicos en lenguaje MPL.**

## TITLE

ReverseLogisticTreatmentModelBBDD;

## OPTIONS

DDatabaseType=Access;

DDatabaseAcces="RLTM.mdb";

## INDEX

i := DDATABASE ("Products", "IdProduct");

j := DDATABASE ("Components", "IdComponent");

## DDA

Sreu[i] := DDATABASE ("Products", "Sreu");

Sout[i] := DDATABASE ("Products", "Sout");

Sref[i] := DDATABASE ("Products", "Sref");

Scan[i,j] := DDATABASE ("Prod\_Comp", "Scan");

Srec[i,j] := DDATABASE ("Prod\_Comp", "Srec");

CP[i] := DDATABASE ("Products", "CP");

T1[i] := DDATABASE ("Products", "T1");

INS[i] := DDATABASE ("Products", "INS");

P[i] := DDATABASE ("Products", "P");

S1[i] := DDATABASE ("Products", "S1");

T2[i] := DDATABASE ("Products", "T2");

Cref[i] := DDATABASE ("Products", "Cref");

DISA[i,j] := DDATABASE ("Prod\_Comp", "DIS");

L[i,j] := DDATABASE ("Prod\_Comp", "L");

S2[i,j] := DDATABASE ("Prod\_Comp", "S2");

T3[i,j] := DDATABASE ("Prod\_Comp", "T3");

Ccan[i,j] := DDATABASE ("Prod\_Comp", "Ccan");

Crec[i,j] := DDATABASE ("Prod\_Comp", "Crec");

## VARIABLES

## PARTE V. APLICACIÓN.

### Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

---

REU[i]            EXPORT TO DDATABASE ("Products" , "REUSE");  
OUT[i]            EXPORT TO DDATABASE ("Products" , "OUTLET");  
REF[i]            EXPORT TO DDATABASE ("Products" , "REFURBISH");  
CAN[i,j]          EXPORT TO DDATABASE ("Prod\_Comp" , "CANNIBALIZATION");  
REC[i,j]          EXPORT TO DDATABASE ("Prod\_Comp" , "RECYCLE");

#### MACROS

IngMer := SUM(i: Sreu[i] \* REU + Sout[i] \* OUT + Sref[i] \* REF);

IngCom := SUM (i,j: Scan[i,j] \* CAN + Srec[i,j] \* REC);

CSim := SUM(i: CP[i] + T1[i] + INS[i]);

CmerREU := SUM(i: P[i] \* REU + S1[i] \* REU + T2[i] \* REU);

CmerOUT := SUM(i: P[i] \* OUT + S1[i] \* OUT + T2[i] \* OUT);

CmerREF := SUM(i: P[i] \* REF + S1[i] \* REF + T2[i] \* REF + Cref[i] \* REF);

CcomCAN := SUM (i,j: DISA[i,j] \* CAN + L[i,j] \* CAN + S2[i,j] \* CAN + T3[i,j] \*  
CAN + Ccan[i,j] \* CAN);

CcomREC := SUM (i,j: DISA[i,j] \* REC + L[i,j] \* REC + S2[i,j] \* REC + T3[i,j] \* REC  
+ Crec[i,j] \* REC);

#### MODEL

MAX Beneficio

= IngMer + IngCom - CSim - CmerREU - CmerOUT - CmerREF - CcomCAN  
- CcomREC;

#### SUBJECT TO

LimitAlter[i,j] -> LAlt:

REU[i] + OUT[i] + REF[i] + CAN[i,j] + REC[i,j] = 1;

#### BINARY

REU[i];

OUT[i];

REF[i];

CAN[i,j];

REC[i,j];

END

### 14.8.2. Anexo. Modelo Matemático de aspectos ambientales en lenguaje MPL.

TITLE

ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb;

OPTIONS

DDatabaseType=Access;

DDatabaseAcces="RLTMamb.mdb";

INDEX

i := DDATABASE ("Products", "IdProduct");

j := DDATABASE ("Components", "IdComponent");

DDA

EIT1[i] := DDATABASE ("Products", "EIT1");

EIT2a[i] := DDATABASE ("Products", "EIT2a");

EIT2b[i] := DDATABASE ("Products", "EIT2b");

EIT3[i,j] := DDATABASE ("Prod\_Comp", "EIT3");

EIP1[i,j] := DDATABASE ("Prod\_Comp", "EIP1");

EIP2[i] := DDATABASE ("Products", "EIP2");

EIP3[i,j] := DDATABASE ("Prod\_Comp", "EIP3");

EIR[i,j] := DDATABASE ("Prod\_Comp", "EIR");

VARIABLES

REU[i] EXPORT TO DDATABASE ("Products", "REUSE");

OUT[i] EXPORT TO DDATABASE ("Products", "OUTLET");

REF[i] EXPORT TO DDATABASE ("Products", "REFURBISH");

CAN[i,j] EXPORT TO DDATABASE ("Prod\_Comp", "CANNIBALIZATION");

REC[i,j] EXPORT TO DDATABASE ("Prod\_Comp", "RECYCLE");

MACROS

EIComun := SUM(i:EIT1[i]);

```

EImerREU      := SUM(i:EIT2a[i] * REU);

EImerOUT      := SUM(i:EIT2b[i] * OUT);

EImerREF      := SUM(i:EIT2a[i] * REF + EIP2[i]* REF);

EIcomCAN      := SUM (i,j: EIP1[i,j] * CAN + EIP3[i,j] * CAN);

EIcomREC      := SUM (i,j: EIP1[i,j] * REC + EIT3[i,j] * REC + EIR[i,j] * REC);
    
```

MODEL

```

MIN EnvironmentalImpact = EIComun + EImerREU + EImerOUT + EImerREF +
EIcomCAN + EIcomREC;
    
```

SUBJECT TO

```

LimitAlter[i,j] -> LAlt:

REU[i] + OUT[i] + REF[i] + CAN[i,j] + REC[i,j]= 1;
    
```

BINARY

```

REU[i];

OUT[i];

REF[i];

CAN[i,j];

REC[i,j];
    
```

END

### 14.8.3. Anexo. Modelo Matemático de aspectos sociales en lenguaje MPL.

TITLE

```

ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamsoc;
    
```

OPTIONS

```

DatabaseType=Access;

DatabaseAcces="RLTMamsoc.mdb";
    
```

INDEX

```

i      := DATABASE ("Products", "IdProduct");

j      := DATABASE ("Components", "IdComponent");
    
```

DATA

## PARTE V. APLICACIÓN.

### Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.

---

```
SI1[i] := DATABASE ("Products", "SI1");  
SI2A[i] := DATABASE ("Products", "SI2A");  
SI2B[i] := DATABASE ("Products", "SI2B");  
SIref[i] := DATABASE ("Products", "SIref");  
SI4[i,j] := DATABASE ("Prod_Comp", "SI4");  
SIrec[i,j] := DATABASE ("Prod_Comp", "SIrec");
```

#### VARIABLES

```
REU[i]      EXPORT TO DATABASE ("Products", "REUSE");  
OUT[i]      EXPORT TO DATABASE ("Products", "OUTLET");  
REF[i]      EXPORT TO DATABASE ("Products", "REFURBISH");  
CAN[i,j]    EXPORT TO DATABASE ("Prod_Comp",  
"CANNIBALIZATION");  
REC[i,j]    EXPORT TO DATABASE ("Prod_Comp", "RECYCLE");
```

#### MACROS

```
SIComun := SUM(i:SI1[i]);  
SImerREU := SUM(i:SI2A[i] * REU);  
SImerOUT := SUM(i:SI2B[i] * OUT);  
SImerREF := SUM(i:SI2A[i] * REF + SIref[i] * REF);  
SIcomCAN := SUM (i,j: SI4[i,j] * CAN);  
SIcomREC := SUM (i,j: SI4[i,j] * REC + SIrec[i,j] * REC);
```

#### MODEL

```
MAX SocialImpact = SIComun + SImerREU + SImerOUT + SImerREF + SIcomCAN  
+ SIcomREC;
```

#### SUBJECT TO

```
LimitAlter[i,j] -> LAlt:  
REU[i] + OUT[i] + REF[i] + CAN[i,j] + REC[i,j] = 1;
```

#### BINARY



**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 14. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de sillones de relax.**

---

REU[i];

OUT[i];

REF[i];

CAN[i,j];

REC[i,j];

END

## **Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados**

## 15.1. Introducción

En España existe una entidad sin ánimo de lucro, creada por iniciativa de los principales fabricantes de neumáticos, con la finalidad de que pueda ser utilizada como mecanismo en el que todos los productores puedan cumplir con las obligaciones que les impone el RD 1619/2005. Dicha entidad, bajo el nombre de SIGNUS Ecovalor, clasifica los neumáticos en cinco grupos tipos según su tamaño:

- A. Moto, scooter o ciclomotor**
- B. Turismo**
- C. Camioneta, 4x4, SUV**
- D. Camión, autobús**
- E. Agrícola, obra pública industrial y otros**

Asimismo, dicha entidad, publica anualmente una memoria donde recoge los principales datos del sector de recuperación de neumáticos. En la última memoria publicada (Memoria anual Signus, 2018), afirman que el número de neumáticos recogidos fue de 16.442.582 unidades, equivalente a 176.791 toneladas, según se puede apreciar en la tabla siguiente (Tabla 52).

CAT	Descripción	PEM	
		Uds.	t
A	Moto, Scooter, ciclomotor	1.040.908	4.581
B	Turismo	12.001.453	88.807
C	Camioneta - 4x4 - SUV	2.213.514	26.321
D	Camión - Autobús	950.684	52.069
E1	Agricultura - Obra Pública - Industrial - Macizos - Manutención - Aeronaves - Quad - Kart - Otros	63.609	116
E2		75.798	818
E3		52.898	1.249
E4		38.350	2.215
E5		5.215	587
E6		153	30
<b>TOTAL</b>		<b>16.442.582</b>	<b>176.791</b>

**Tabla 52.** Datos de neumáticos puestos en el mercado en 2018 (Memoria anual Signus, 2018).

Dicha entidad es financiada a través del **ecovalor** para garantizar la correcta gestión del neumático usado. Este parámetro es el mismo que se repercute en toda la cadena

comercial, siendo el importe que debe abonar todo propietario de neumáticos usados para que estos reciban un correcto tratamiento. El importe correspondiente al año 2018 en España, según el tipo de neumático es el siguiente:

CAT	Descripción	Detalle de los productos	€/ ud.
A	Moto, Scooter, ciclomotor	Todos los productos	0,77
B	Turismo	Todos los productos	1,28
C	Camioneta - 4x4 - SUV	Todos los productos	2,09
D	Camión - Autobús	Todos los productos	9,57
E1	Agricultura - Obra Pública - Industrial - Macizos - Manutención - Aeronaves - Quad - Kart - Otros	0,00 - 5,00 kgs	0,32
E2		5,01 - 20,00 kgs	1,88
E3		20,01 - 50,00 kgs	4,12
E4		50,01 - 100,00 kgs	10,07
E5		100,01 - 200,00 kgs	19,61
E6		> 200,01 kgs	34,32

**Tabla 53.** Ecovalor vigente en España durante el 2018 (Memoria anual Signus 2018).

Durante el ejercicio 2018 fueron recogidas un total de 189.550 toneladas de neumáticos, sobre las que, una vez trasladadas a las plantas de recogida y clasificación, se realiza una inspección visual e individual para distinguir los neumáticos entre: Neumáticos susceptibles de ser reutilizados (NUR) y Neumáticos al final de su vida útil (NFVU).

A continuación, se aporta más información sobre cada una de estas dos categorías:

- **Neumáticos susceptibles de ser reutilizados (NUR):** Neumáticos que pueden ser reutilizados, generalmente tras una intervención sobre el mismo.



**Figura 265.** Neumáticos susceptibles de ser reutilizados (Memoria Signus, 2017)

Durante el año 2018, se prepararon para la reutilización, un total de 23.973 toneladas, lo que equivale a un 12'6 % del total de neumáticos recuperados (Signus 2018).

Según los datos de los últimos años, de los neumáticos pequeños recogidos (tipo B y C) se destinan a reutilización entre el 25 % y el 30%, mientras que en los neumáticos medianos (tipo D) son entre el 5% y el 7% y para neumáticos grandes (tipo E) el porcentaje de reutilización está sobre el 0'1 %. Este descenso de porcentaje de reutilización según aumenta el tamaño del neumático está directamente relacionado con el uso y el desgaste en el que se encuentra el neumático cuando es sustituido (Pérez y Saiz, 2018), a mayor tamaño del neumático, el uso y el desgaste es mayor.

Centrando el estudio en los neumáticos de turismo (tipo B), los cuales suponen cerca del 75% del total de neumáticos puestos en el mercado en España (ver Tabla 52), cuando un neumático usado es clasificado inicialmente como **NUR**, tiene varias alternativas de disposición o salidas al mercado, en función del estado del neumático, de la demanda del mercado y sobre todo de la lámina o banda de rodamiento. Cabe señalar que la legislación nacional española no permite la circulación con neumáticos con una banda de rodamiento inferior a 1'6 mm "**Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Vehículos**". Por ello, las alternativas de disposición que se contemplan son las siguientes:

- Reintroducirlos en el mercado nacional sin intervenir sobre ellos.
- Reintroducirlos en mercados extranjeros menos restrictivos con la dimensión de la banda de rodamiento.
- Reacondicionarlos para introducirlos de nuevo en el mercado nacional.
- **Neumáticos al final de su vida útil (NFVU):** Neumáticos que ya no tienen potencial de uso alguno y no sirven para circular ni son aptos para ser reacondicionados, ya que presentan algún tipo de defecto, rotura, desgarró, desperfecto, ...



**Figura 266.** Neumático al final de su vida útil (Memoria Signus 2017)

Cuando los neumáticos son designados como **NFVU**, son valorizados (triturados) para separar sus componentes (principalmente acero, fibra y caucho) y tratar de aprovechar el valor que aún les pueda quedar mediante el reciclaje o la incineración.

A lo largo del ejercicio 2018, la cantidad de componentes puestos de nuevo en el mercado fue de 95.081 t, destacando que 23.773 t (25'4%) fueron de acero, 12.752 t (12%) de fibra o textil y 58.556 t (62'6%) fueron de granulado de caucho.

El **acero** que se extrae tras la valorización de los neumáticos se recicla utilizándose como materia prima de alta calidad por parte de las empresas siderúrgicas. La **fibra** que se consigue separar en la valorización se utiliza fundamentalmente como combustible de la industria cementera, aunque empieza a ser destinado también como suelo ecuestre.

El mayor componente del neumático valorizado es el **caucho**, el cual se suele granular en diferentes tamaños (granulometrías) según el uso que se le vaya a dar. Mayoritariamente, el granulado de caucho suele utilizarse como rellenos de césped artificial (46'5% en el 2018), como pavimentos de seguridad (24'4 % en el 2018) y muchos otros usos como fabricación de piezas de caucho, fabricación de mezclas bituminosas e incluso como combustible de empresa cementera.

En el presente capítulo se describe la adaptación del modelo genérico integrado del Marco de Referencia a un ejemplo real como es la recogida, clasificación y tratamiento de **neumáticos usados**. En este ejemplo, se analiza una **red de LI de lazo abierto** que abarca la recogida del neumático del taller, la designación sobre la disposición a aplicar al neumático usado y la posterior intervención a realizar.

Actualmente, la empresa sigue una **política de decisión fija** sobre la disposición de productos de LI que se expone a continuación:

- **Neumáticos susceptibles de ser reutilizados (NUR):** Generalmente estos neumáticos se reagrupan hasta que se tienen grandes cantidades y los venden en mercados nacionales como neumáticos de ocasión. El problema es que cuesta reintroducirlos en el mercado nacional, sobre todo por falta de demanda, por tanto, si encuentran una buena oferta, los venden en mercados extranjeros que son menos restrictivos y pueden absorber mayor volumen de neumáticos. El neumático recauchutado suele ser muy costoso y muchas veces no sale rentable si no se vende pronto, porque aparte de los costes de intervención o remanufactura hay que añadirle los de almacenamiento.
- **Neumáticos al final de su vida útil (NFVU):** Básicamente son valorizados para aprovechar sus componentes de la siguiente manera:
  - **Acero:** El alambre es fácilmente reutilizable, por lo que se suele vender a terceros, como empresas siderúrgicas.
  - **Fibra:** Se incinera, generalmente, ya que no tiene nuevo uso.
  - **Caucho:** Este material es el que se encuentra en mayor medida en el neumático y la primera operación que se realiza es la trituración. Una vez triturado el caucho, bien se destina a incineración y generación de energía, sobretodo en cementeras (cada vez menos), o bien se tritura para hacerlo en polvo y se vende como materia prima para elaborar campos de césped artificial, parques infantiles, aislamiento ....

A continuación, se aplicará el Marco de Referencia diseñado, adaptando el modelo genérico al ejemplo de aplicación, con el objetivo de proporcionar a la empresa una herramienta que les ayude a identificar cuál sería la disposición más adecuada para cada caso concreto de LI, no sólo basándose en factores económicos, sino con la inclusión de factores ambientales y sociales. Además, se desarrollará el manual de usuario para la gestión de la recuperación de productos que ayudará a parametrizar los valores y utilizar la herramienta al responsable de tomar la DD en el día a día de la empresa.

Por tanto, el objetivo inicial del capítulo será aplicar la metodología de adaptación del modelo genérico integrado al caso de los neumáticos usados, obteniendo así el modelo particular integrado. Posteriormente, se desarrollará el manual de usuario que servirá de ayuda al encargado de la herramienta a parametrizar los valores y tomar la mejor DD. Finalmente, se ejemplificarán tres casos reales en los que se aplicará el manual de usuario para determinar la mejor disposición en cada producto recuperado.

Para ello, en la siguiente sección (sección 15.2), se adapta el modelo genérico integrado al caso concreto de los neumáticos usados, siguiendo los pasos de la metodología desarrollada a tal efecto:

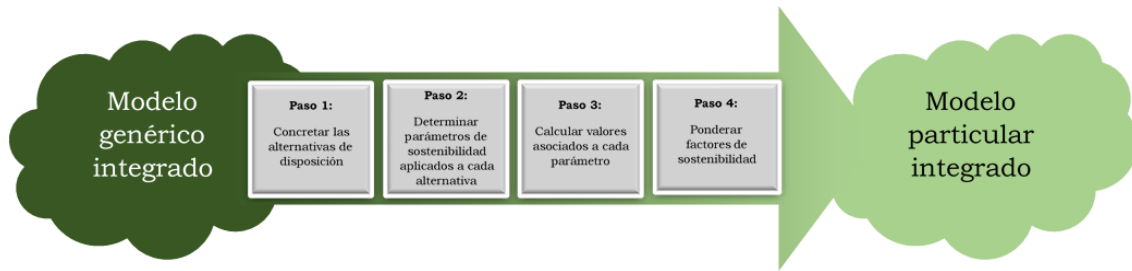
1. Concretar las alternativas de disposición
2. Determinar los parámetros de sostenibilidad aplicables a las alternativas
3. Calcular los valores asociados a cada parámetro
4. Ponderar factores de sostenibilidad

El resultado de esta adaptación es un modelo particular integrado, compuesto por el modelo particular del PLI, que incorpora el subproceso de solución, y el modelo matemático particular. En la sección 15.3 se desarrolla el manual de usuario para la gestión de las recuperaciones. En la sección 15.4 se aplica el manual de usuario a tres ejemplos reales. Los resultados obtenidos se analizan en la sección 15.5. Posteriormente, en la sección 15.6, se plantean las conclusiones generales del capítulo, en la sección 15.7 se exponen las referencias utilizadas y en la sección 15.8 se anexan los modelos de programación MPL utilizados en el ejemplo de aplicación de los neumáticos usados.

## **15.2. Adaptación del modelo genérico integrado al ejemplo de aplicación de neumáticos usados: aplicación de la metodología de adaptación.**

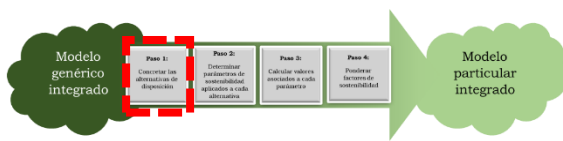
A continuación, se aplica la metodología de adaptación del modelo genérico integrado al ejemplo de aplicación, siguiendo los pasos expuestos en el capítulo 13 y resumidos en la siguiente figura (Figura 267):





**Figura 267.** Metodología de adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado  
(Elaboración Propia)

### 15.2.1. Paso 1. Concretar las alternativas de disposición.



El modelo genérico integrado proporciona toda la casuística posible del PLI y su adaptación al caso particular consiste

precisamente en seleccionar, de esa casuística posible, cuáles son las alternativas que aplican en este caso. Para ello, se va a utilizar la tabla diseñada a tal efecto en la metodología de adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado (Tabla 23) donde se muestran las ocho posibles alternativas de disposición:

Alternativas de disposición	
	1.- Reutilización
	2.- Reparación
	3.- Reacondicionamiento
	4.- Remanufacturación
	5.- Canibalización
	6.- Reciclaje
	7.- Incineración
	8.- Vertido

**Tabla 54.** Posibles alternativas de disposición para seleccionar si se aplican al ejemplo de aplicación o no  
(Elaboración propia).

En esta tabla, además, se van a marcar las alternativas que son aplicables al ejemplo de aplicación de los neumáticos usados y las que no a través de la simbología siguiente:



*Alternativa que se aplica al ejemplo de aplicación*



*Alternativa que no se aplica al ejemplo de aplicación*

El ejemplo de aplicación se centra en un neumático pequeño (automóvil o furgoneta), que es recuperado por la planta de recogida y clasificación. En dicha planta se decide la disposición de cada neumático en función de su estado.

A continuación, se van a revisar las alternativas una a una, para ver cuál procede a ser considerada. Al tratarse de una CdS de lazo abierto, la empresa recolectora de neumáticos se dedica en exclusiva a tratar productos usados, determinando la disposición de cada neumático entre las siguientes opciones:

**1. Reutilización.** Sin intervención sobre el producto y con la finalidad de reintroducción al mercado.

Se interviene lo menos posible sobre el neumático para volver a sacarlo al mercado. En esta alternativa, se intenta incurrir en pocos gastos en las operaciones de puesta a punto (limpieza, transporte, almacenaje ...). En este ejemplo de aplicación, se consideran dos tipos diferentes de reutilización, según el canal de venta:

- a. **Reutilización directa (Neumático de Ocasión).** Sin intervención sobre el producto y con la finalidad de reintroducción en el mercado como producto de segunda mano. Su precio de venta al público es ligeramente inferior al producto nuevo, con un escaso margen de beneficio.
- b. **Reutilización directa terceros países (Neumático de Gomilla).** Sin intervención sobre el producto y con la finalidad de reintroducción en el mercado extranjero de terceros países. En estos casos, el neumático sigue siendo apto para circular, pero el nivel de lámina es insuficiente para circular en España o Europa, por normativa. Por tanto, dicho neumático es exportado a terceros países con legislación menos restrictiva (África principalmente). En estos casos, los costes son comunes a los del caso

anterior, con la excepción del coste de transporte que será sensiblemente superior, pero al exportar en grandes cantidades, los costes por unidad se reducen.

**2. Reparación.** Con intervención sobre el producto y con la finalidad de reintroducción en el mercado.

Los neumáticos usados no son reparados por la empresa analizada, ya que el grado de intervención sobre los productos recuperados es mayor, dejándolo como nuevo a través del reacondicionamiento.

**3. Reacondicionamiento (Neumático de Carcasa).** Con intervención sobre el producto y con la finalidad de reintroducción en el mercado.

En este caso, el neumático se encuentra en buen estado, pero se debe intervenir sobre él (reacondicionar o *recauchutar*) para poder sacarlo de nuevo al mercado. Este proceso suele ser muy costoso y muchas veces no sale rentable, económicamente hablando, si no se vende pronto el neumático, porque a los costes de reacondicionamiento hay que añadirle el almacenamiento.

**4. Remanufacturación.** Con intervención sobre el producto y con la finalidad de reintroducción en el mercado.

Siguiendo las indicaciones del apartado anterior, la intervención realizada por parte de la empresa sobre el producto recuperado, para volver a sacarlo al mercado, es considerada como reacondicionamiento y no como remanufacturación, debido a que los componentes que no funcionan bien no son remanufacturados, sino que son sustituidos por componentes nuevos.

**5. Canibalización.** Con intervención sobre el producto y con la finalidad de aprovechamiento de componentes.

El neumático se tritura para trabajar con sus componentes (valorización), pero no son aprovechados para la elaboración de nuevos neumáticos

**6. Reciclaje.** Con intervención sobre el producto y con la finalidad de aprovechamiento de componentes.

Entre los componentes del neumático usado, el alambre/acero y el caucho son fácilmente reciclables y aprovechables para nuevos usos. El acero es fácilmente

reciclable como materia prima para la fabricación de acero por parte de las empresas siderúrgicas gracias a su alta calidad. Del mismo modo, el caucho se tritura para hacerlo en polvo y se vende como materia prima (según la granulometría) para elaborar campos de césped artificial, pistas deportivas, parques infantiles, aislamientos, carreteras asfálticas ....







**7. Incineración. Eliminación sin recuperación de valor.**

Entre los componentes del neumático usado, la fibra y el caucho son materiales que, debido a su alta capacidad energética, suelen ser incinerados en la industria cementera o acerías como combustible sólido.

**8. Vertido. Eliminación sin recuperación de valor.**

Debido a su alta capacidad de contaminación, no se considera que ningún componente sea eliminado, tras un vertido, sin opción de recuperar valor.

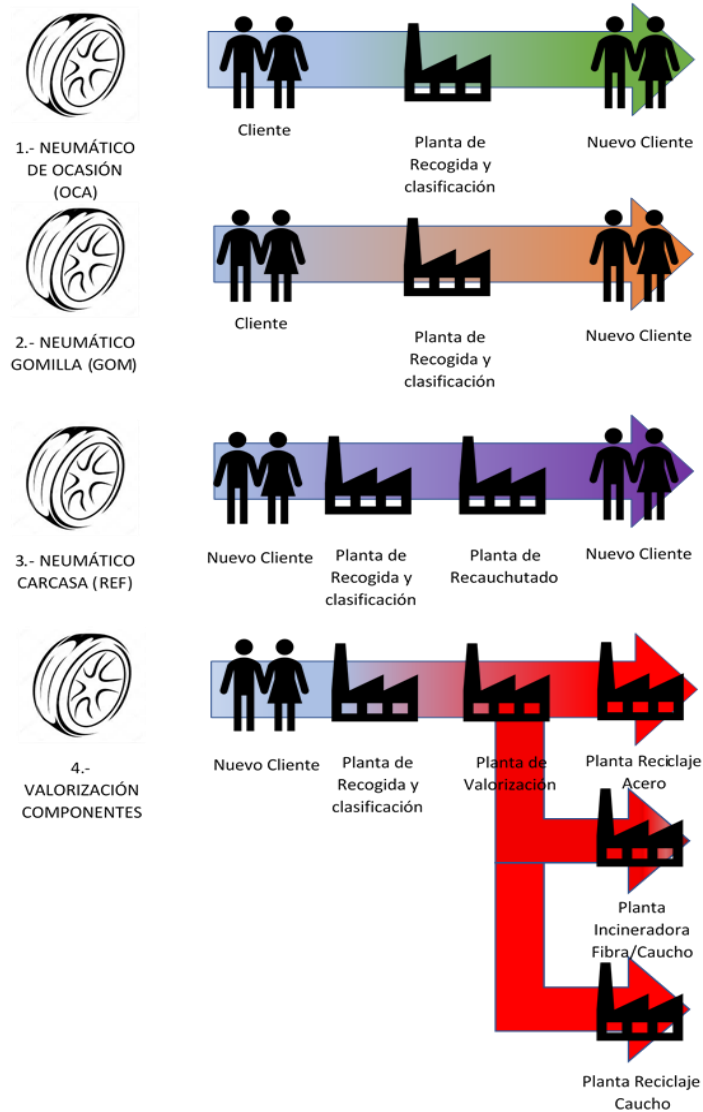
Tras la revisión de todas las alternativas de disposición, se muestran en la siguiente tabla (Tabla 55) cuáles son aplicables y cuáles no:

Alternativas de disposición	
	1.- Reutilización a) Mercado directo (Ocasión) b) Mercado directo a terceros (Gomilla)
	2.- Reparación
	3.- Reacondicionamiento (Carcasa)
	4.- Remanufacturaación
	5.- Canibalización
	6.- Reciclaje - <i>Acero/Alambre</i> - <i>Caucho</i>

	<p>7.- Incineración</p> <p>- Textil/Fibra</p> <p>- Caucho</p>
	<p>8.- Vertido</p>

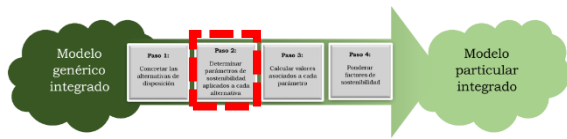
**Tabla 55.** Alternativas de disposición aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

Al tratarse de una red de **LI de lazo abierto**, son empresas especializadas las encargadas del tratamiento de los productos de manera que, en base al ejemplo de aplicación, la configuración de la red de LI para cada alternativa quedaría de la siguiente manera:



**Figura 268.** Esquema configuración de la red para cada alternativa de tratamiento (Elaboración Propia)

**15.2.2. Paso 2. Determinar los parámetros de sostenibilidad aplicados a cada alternativa.**



Una vez concretadas las alternativas aplicables al ejemplo de aplicación se determinan cuáles son los parámetros de sostenibilidad adecuados a cada alternativa, según el caso concreto. Para ello, se revisan todos los parámetros definidos en el Capítulo 9 (apartado 9.3) y se eliminan aquellos que no sean aplicables al ejemplo de aplicación.

sostenibilidad adecuados a cada alternativa, según el caso concreto. Para ello, se revisan todos los parámetros definidos en el Capítulo 9 (apartado 9.3) y se eliminan aquellos que no sean aplicables al ejemplo de aplicación.

**15.2.2.1. Parámetros económicos**

○ **Ingresos.**

Siguiendo la estructura planteada en la identificación de los aspectos económicos a considerar en cada alternativa (apartado 9.3.1), se expone a continuación la estructura de ingresos relacionados con las alternativas de LI:

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD	+ OTROS INGRESOS COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	<ul style="list-style-type: none"> <li>1. Reutilización/reventa</li> <li>2. Reparación</li> <li>3. Reacondicionamiento</li> <li>4. Remanufacturación</li> </ul>	Ingreso por venta del producto en el mercado	Subvenciones por el tratamiento de productos y/o componentes
APROVECHAMIENTO DE COMPONENTES	<ul style="list-style-type: none"> <li>5. Canibalización</li> <li>6. Reciclaje</li> </ul>	Ingresos por venta para aprovechamiento de componentes	
ELIMINACIÓN SIN RECUPERAR VALOR	<ul style="list-style-type: none"> <li>7. Incineración</li> <li>8. Vertido</li> </ul>	Ingresos por generación de energía	

**Figura 269.** Estructura de ingresos relacionados con la LI con el desglose de los ingresos comunes y de los otros ingresos (Elaboración propia).

A continuación, se van a **revisar todos los posibles ingresos relacionados con la LI** identificados en el Marco de Referencia para ver cuáles procede considerar en el ejemplo de aplicación porque sean aplicables y cuales no procede considerar.

Ingresos obtenidos por reintroducción del producto en el mercado:

Se establece el parámetro correspondiente al ingreso según las alternativas con la finalidad de reintroducción al mercado posibles: ingreso por venta por reutilización/reventa como neumático de ocasión (**Socai**), ingreso por venta por reutilización/reventa como neumático de gomilla (**Sgomi**) e ingreso por venta por reacondicionamiento como neumático recauchutado (**Srefi**).

Ingresos obtenidos por aprovechamiento de componentes:

Según las alternativas de disposición con la finalidad de aprovechamiento de componentes viables en el ejemplo de aplicación, se establecen los ingresos obtenidos en este apartado. Se contempla, por tanto, los ingresos por el reciclaje del acero (**Srec11**) y los ingresos por el reciclaje del caucho (**Srec13**).

Ingresos obtenidos por generación de energía

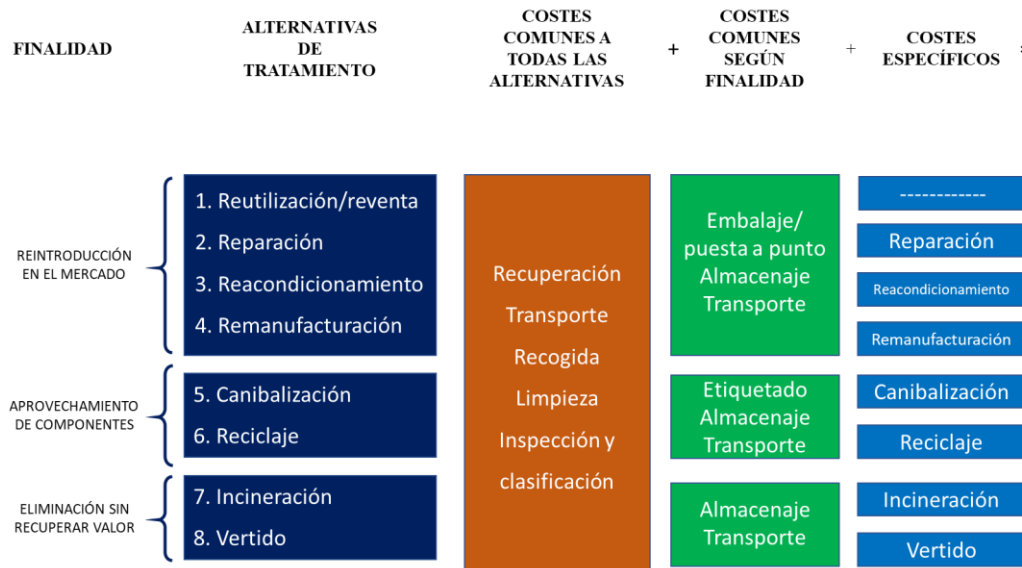
Debido a que la generación de energía se obtiene tras la alternativa de incineración, se contempla los ingresos por venta para incinerar de la fibra (**Sbur12**) o del caucho (**Sbur13**).

Otros ingresos comunes a todas las alternativas:

Se considera una subvención obtenida por recuperar y gestionar el neumático usado, mediante su reintroducción en el mercado o el tratamiento de sus componentes (**SUBij**).

○ **Costes.**

Siguiendo la estructura planteada en la identificación de los aspectos económicos a considerar en cada alternativa (apartado 9.3.1) se expone a continuación la estructura de costes relacionados con las alternativas de LI:



**Figura 270.** Estructura de costes relacionados con la LI con el desglose de los costes comunes y específicos (Elaboración propia).

A continuación, se van a **revisar todos los posibles costes relacionados con las alternativas de disposición de LI** para ver cuáles procede considerar en el ejemplo de aplicación porque sean aplicables y cuáles no deben ser considerados.

Costes comunes a todas las alternativas de disposición:

En el caso de los neumáticos usados, se consideran costes comunes a todas las opciones, al coste de transporte del producto desde el cliente hasta la planta distribuidora/clasificadora ( $CT_{1i}$ ). Se tendrá en cuenta el coste de inspección y clasificación ( $CIS_i$ ), incluyendo en él la recogida y almacenaje previo ( $COL_i$ ), debido a la simplicidad de estas operaciones. Para el presente ejemplo de aplicación, ni el coste de recuperación del producto ( $CP_i$ ) ni el de limpieza ( $CLE_i$ ) no son considerados, ya que no se abona ninguna cantidad por adquisición del producto al cliente y el producto no se limpia en esta fase del PLI.

Costes Comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado:

Se considera para estos casos los costes de embalaje y puesta a punto ( $COP_i$ ) y el coste de almacenaje previo a la entrega ( $CS_{1i}$ ). En este



ejemplo, el posterior transporte hasta el cliente ( $CT_{2i}$ ) se considerará dentro del coste específico de cada alternativa por ser diferente entre ellas.

Costes Comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:

Debido a que las operaciones de aprovechamiento de componentes pasan por la planta de valorización, el transporte del producto desde la planta de recogida y clasificación hasta la planta de valorización ( $CT_{3ij}$ ) será un coste común para la alternativa con la finalidad de aprovechamiento de componentes (solamente reciclaje en este ejemplo). Este coste no estaba inicialmente contemplado en el modelo genérico, por lo que se añade en este caso para poder adaptarlo al ejemplo de aplicación. Además, en este caso debe trocearse inicialmente el producto ( $CL_{1ij}$ ) antes de ser destinado para reciclaje o incineración (**valorización Fase I**). Este coste de la primera fase de la valorización incluye la recepción, alimentación de la máquina el troceado y un primer almacenaje. Posteriormente, se contempla también para todas las alternativas el coste de granulado ( $CS_{2ij}$ ) del producto (**valorización Fase II**), incluyendo el transporte interno, la separación de componentes, el ensacado, almacenaje y carga de los componentes para transportarlos a su nuevo destino. Finalmente, las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes cuentan con el coste del transporte desde la planta de valorización hasta la planta de intervención ( $CT_{4ij}$ ), el reciclaje en este ejemplo. En el modelo genérico, este coste se representa con  $CT_{3ij}$ , pero en el presente ejemplo de aplicación ha sido renombrado según la necesidad y siguiendo el orden en los costes de transporte.

Costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto sin recuperación de valor:

En este ejemplo de aplicación, la alternativa de incineración está contemplada para los componentes de fibra y caucho. Los costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto (solamente incineración en este ejemplo) son los mismos que los costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, es decir,

el transporte del producto desde la planta de recogida y clasificación hasta la planta de valorización ( $CT_{3ij}$ ), el troceo inicial el producto ( $CL_{1ij}$ ) y el coste de granulado ( $CS_{2ij}$ ), que en este caso mantiene el mismo parámetro que la alternativa anterior por compartir las mismas operaciones. Finalmente, las alternativas con la finalidad de eliminación del producto (incineración en este ejemplo) cuentan con el coste del transporte desde la planta de valorización hasta la planta de incineración ( $CT_{5ij}$ ). En este caso también se renombra el parámetro para seguir el orden cronológico en los parámetros de transporte.

Costes específicos de cada alternativa de disposición:

Aunque en el modelo genérico integrado no se contemplan costes específicos en la alternativa de reutilización, en el presente ejemplo de aplicación se ha considerado conveniente transformar el coste del transporte desde la planta de clasificación hasta el nuevo cliente ( $CT_{2i}$ ) como coste específico de cada alternativa con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado, ya que dicho coste varía en gran medida según la alternativa de disposición. De esta forma, son considerados como costes específicos de las alternativas de reutilización, tanto de la alternativa de “ocasión” ( $Cocai$ ) como de la alternativa de “gomilla” ( $Cgom_i$ ), el coste de cargar el camión y del transporte desde la planta clasificadora hasta el nuevo cliente. Respecto a la alternativa de recauchutado, se engloba en un mismo coste ( $Cref_i$ ) la adquisición del producto por parte de la planta recauchutadora a la planta de recogida y clasificación, la operación de recauchutado de cada neumático y el transporte desde la planta de clasificación hasta la planta de recauchutado y desde esta al cliente final. La alternativa de reciclaje cuenta con el coste específico formado por el coste de la operación propia de reciclaje del producto ( $Crec_{ij}$ ). Finalmente, la alternativa de incineración cuenta con el coste específico formado por el coste propio de la incineración ( $Cburi_{ij}$ ) y de gestión de residuos ( $Crm_{i,j}$ ).

A continuación, se muestra una tabla (Tabla 56) donde se marcan los parámetros económicos que son aplicables al ejemplo de aplicación, de entre todos los parámetros

recogidos en el modelo genérico. Se establece una marca verde para los parámetros que son aplicables y una marca roja para los que no se aplican en el ejemplo. En línea con el código de colores utilizado en las figuras de ingresos y costes, cada parámetro se ha coloreado según el tipo de parámetro al que pertenece (verde – parámetros comunes según finalidad, marrón – comunes para todas las alternativas y azul – específicos para cada alternativa).

INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
✓	<b>Soca<sub>i</sub></b>	ingresos por reutilización del producto i como neumático de ocasión
✓	<b>Sgom<sub>i</sub></b>	ingresos por reutilización del producto i neumático de gomilla
✗	<b>Srep<sub>i</sub></b>	ingresos por reparación del producto i
✓	<b>Sref<sub>i</sub></b>	ingresos por reacondicionamiento del producto i
✗	<b>Srem<sub>i</sub></b>	ingresos por remanufacturación del producto i
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
✗	<b>Scan<sub>i,j</sub></b>	ingresos por canibalización del componente j obtenido del producto i
✓	<b>Srec<sub>i,j</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente j obtenido del producto i
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:		
✓	<b>Sbur<sub>i,j</sub></b>	ingresos por incineración del componente j obtenido de producto i
OTROS INGRESOS COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
✓	<b>SUB<sub>i,j</sub></b>	ingresos obtenidos por subvención de gestión del componente j obtenido del producto i
COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
✗	<b>CP<sub>i</sub></b>	coste de recuperación del producto i desde el cliente
✓	<b>CT<sub>li</sub></b>	coste de transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa
✗	<b>COL<sub>i</sub></b>	coste de recogida y almacenaje del producto i

✗	<b>CLE<sub>i</sub></b>	coste de limpieza del producto i
✔	<b>CIS<sub>i</sub></b>	coste de inspección y clasificación del producto i
<b>COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
✔	<b>COP<sub>i</sub></b>	coste de embalaje del producto i para reutilización o reventa
✔	<b>CS<sub>1i</sub></b>	coste de almacenaje del producto i antes de la reutilización o reventa
✗	<b>CT<sub>2i</sub></b>	coste de transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente <b>(incluido dentro del coste específico de cada alternativa)</b>
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
✔	<b>CT<sub>3i,j</sub></b>	coste de transporte del componente j del producto i desde la planta de recogida y clasificación hasta la planta de valorización <b>Nuevo parámetro incluido en el ejemplo de aplicación</b>
✔	<b>CL<sub>i,j</sub></b>	coste de troceado del componente j del producto i <b>(valorización Fase I)</b>
✔	<b>CS<sub>2i,j</sub></b>	coste de granulado del componente j del producto i <b>(valorización Fase II)</b>
✔	<b>CT<sub>4i,j</sub></b>	coste de transporte desde la planta de valorización hasta la planta de intervención del componente j del producto i <b>Considerando como CT<sub>3i,j</sub> en el modelo genérico</b>
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto:		
✔	<b>CT<sub>3i,j</sub></b>	coste de transporte del componente j del producto i desde la planta de recogida y clasificación hasta la planta de valorización
✔	<b>CL<sub>i,j</sub></b>	coste de troceado del componente j del producto i <b>(valorización Fase I)</b>
✔	<b>CS<sub>2i,j</sub></b>	coste de granulado del componente j del producto i <b>(valorización Fase II)</b> <b>Considerando como CS<sub>3i,j</sub> en el modelo genérico</b>
✔	<b>CT<sub>5i,j</sub></b>	coste de transporte desde la planta de valorización hasta la planta de intervención del componente j del producto i <b>Contemplado como CT<sub>4i,j</sub> en el modelo genérico</b>

COSTES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
✓	<b>Coca<sub>i</sub></b>	costes por reutilización del producto i como neumático de ocasión
✓	<b>Cgom<sub>i</sub></b>	costes por reutilización del producto i neumático de gomilla
✗	<b>Crep<sub>i</sub></b>	coste de reparación del producto i
✓	<b>Cref<sub>i</sub></b>	coste de reacondicionamiento del producto i
✗	<b>Crem<sub>i</sub></b>	coste de remanufacturaación del producto i
✗	<b>Ccan<sub>i,j</sub></b>	coste de canibalización del componente j del producto i
✓	<b>Crec<sub>i,j</sub></b>	coste de reciclaje del componente j del producto i
✓	<b>Cbur<sub>i,j</sub></b>	coste de incineración del componente j del producto i
✓	<b>Crm<sub>i,j</sub></b>	coste de gestión de los residuos del componente j del producto i
✗	<b>Cdis<sub>i,j</sub></b>	coste de vertido del componente j del producto i

**Tabla 56.** Parámetros económicos aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

A continuación, se muestra una nueva figura (Figura 216) en la que se combina la estructura de ingresos y costes con los parámetros económicos:

PARTE V. APLICACIÓN.  
 Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

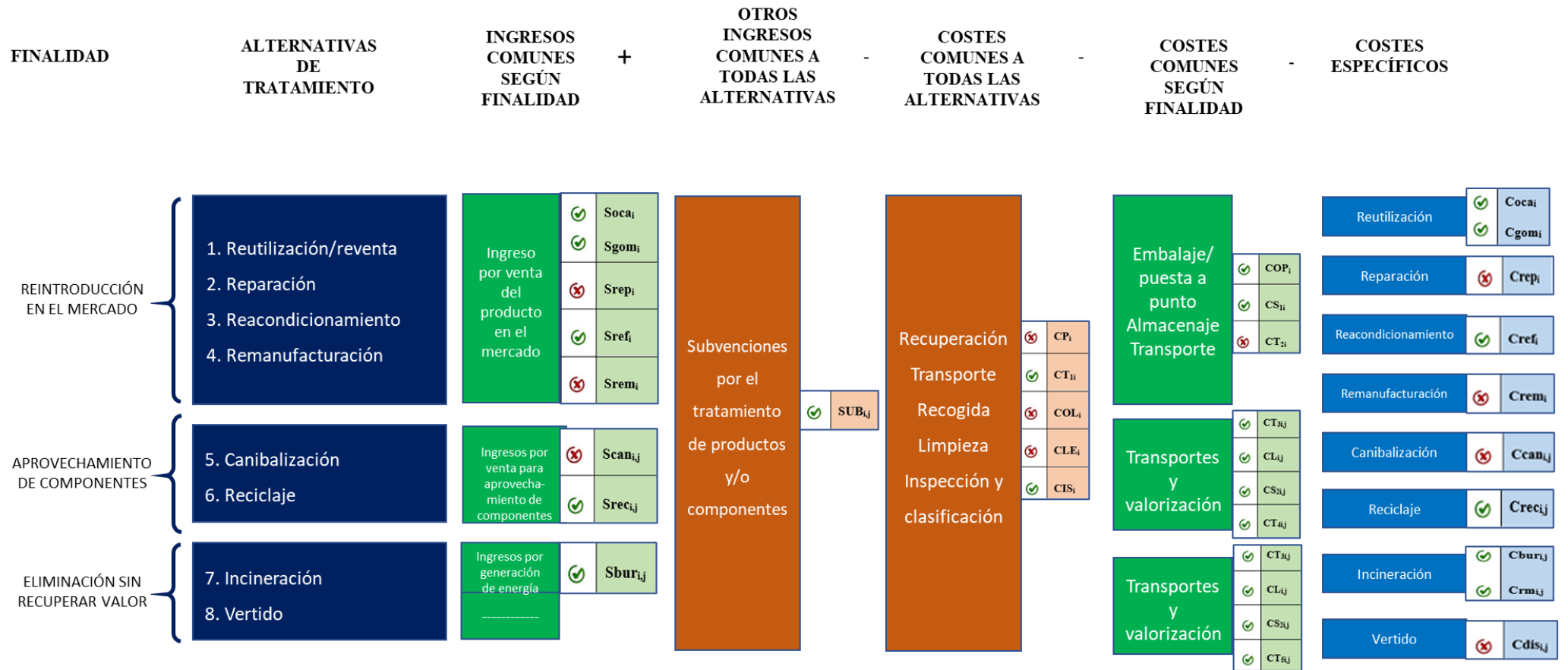


Figura 271. Combinación de la estructura de ingresos y costes con los parámetros económicos aplicables al ejemplo (Elaboración propia).

15.2.2.2. *Parámetros ambientales*

Siguiendo la estructura planteada en la identificación de los aspectos ambientales a considerar en cada alternativa (apartado 9.3.2), se expone a continuación la estructura de aspectos ambientales relacionados con las alternativas de LI:



**Figura 272.** Estructura de aspectos ambientales relacionados con la LI con el desglose de los aspectos ambientales comunes y específicos (Elaboración propia).

A continuación, se van a **revisar todos los posibles parámetros, relacionados con cada uno de los aspectos ambientales de las alternativas de disposición de LI**, para ver cuáles procede considerar en el ejemplo de aplicación de los neumáticos usados porque sean aplicables y cuales no son considerados.

Parámetros ambientales comunes a todas las alternativas:

Se considera común a todas las alternativas, el impacto ambiental del transporte del neumático desde el cliente hasta la empresa, correspondiendo el parámetro **EIT<sub>ii</sub>**.

Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:

Todas las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado contempladas en el presente ejemplo de aplicación, sea producto como nuevo o como outlet, contarán con el impacto ambiental

dado por el transporte del producto desde la empresa hasta el cliente final, correspondiendo el parámetro  $EIT_{2i}$ .

Asimismo, todas las intervenciones sobre los productos que van a ser reintroducidos en el mercado se realizan en las mismas instalaciones, por tanto, el impacto ambiental de transporte desde el centro de decisión hasta la zona en la que se interviene sobre el producto no se considera en el presente ejemplo de aplicación.

Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:

Las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes tienen en común el parámetro ambiental correspondiente al transporte desde la planta de recogida y clasificación hasta la planta de valorización ( $EIT_{3ij}$ ). Además, para este tipo de alternativas se contempla el impacto ambiental propio de la valorización del producto ( $EIP_{2ij}$ ). Además, las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes contarán con el impacto ambiental dado por el transporte del producto ( $EIT_{4ij}$ ) desde la planta de valorización hasta el centro de intervención, o de reciclaje en este ejemplo.

Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto sin recuperación de valor:

Del mismo modo que ocurría con los parámetros económicos, las alternativas con la finalidad de eliminación del producto consideradas en el presente ejemplo de aplicación tienen en común los mismos parámetros que las alternativas con la finalidad del aprovechamiento de componentes que corresponden a la valorización del producto. Es decir, el parámetro ambiental del transporte desde la planta de recogida y clasificación hasta la planta de valorización ( $EIT_{3ij}$ ) y el impacto ambiental de la valorización del producto ( $EIP_{2ij}$ ). Además, las alternativas con la finalidad de eliminación del producto contarán con el impacto ambiental dado por el transporte del producto ( $EIT_{5ij}$ ) desde la planta de valorización hasta la planta de incineración.



Parámetros ambientales específicos a cada alternativa de disposición:

Respecto a las alternativas de disposición que no se contemplan en el ejemplo de aplicación (reparación, remanufacturación, canibalización y vertido), evidentemente no se tienen en cuenta sus parámetros ambientales específicos en este estudio.

Para las alternativas que sí están disponibles en el caso de los neumáticos usados, se considera el impacto ambiental específico debido a las operaciones realizadas durante la intervención de reacondicionamiento del producto (**EIP<sub>1i</sub>**). Asimismo, se le considerará el impacto ambiental según la alternativa definitiva para cada componente, reciclaje (**EIR<sub>ij</sub>**) o **incineración** (**EII<sub>ij</sub>**).

A continuación, se presenta la tabla genérica de los parámetros ambientales, coloreados según el código empleado en los apartados anteriores (verde – parámetros comunes según finalidad, marrón – parámetros comunes para todas las alternativas y azul – parámetros específicos para cada alternativa), con la indicación de si son aplicables o no para el presente ejemplo:

PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
✔	<b>EIT<sub>1i</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa
PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
✔	<b>EIT<sub>2i</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
✔	<b>EIT<sub>3ij</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente j del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización) ( <b>Se aprovecha el nombre del parámetro anterior que no se aplica en este ejemplo</b> )
✔	<b>EIP<sub>2i,j</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente j del producto i

✔	<b>EIT<sub>4i,j</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente j del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperar valor		
✔	<b>EIT<sub>3ij</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente j del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)
✔	<b>EIP<sub>2i,j</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente j del producto i
✔	<b>EIT<sub>5i,j</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente j del producto i la planta de valorización hasta el centro eliminación por incineración
PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
✘	<b>EIP<sub>1i</sub></b>	impacto ambiental de reparación del producto i
✔	<b>EIP<sub>2i</sub></b>	impacto ambiental de reacondicionamiento del producto i ( <b>Renombrado como EIP<sub>1i</sub> en el ejemplo de aplicación</b> )
✘	<b>EIP<sub>3i</sub></b>	impacto ambiental de remanufacturaación del producto i
✘	<b>EIP<sub>4i,j</sub></b>	impacto ambiental de canibalización del componente j del producto i
✔	<b>EIR<sub>i,j</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente j del producto i
✔	<b>EII<sub>i,j</sub></b>	impacto ambiental de incineración del componente j del producto i
✘	<b>EIL<sub>i,j</sub></b>	impacto ambiental de vertido del componente j del producto i

**Tabla 57.** Parámetros ambientales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

A continuación, se muestra una nueva figura (Figura 273) en la que se combina la estructura de impacto ambientales con los parámetros ambientales aplicables al ejemplo:

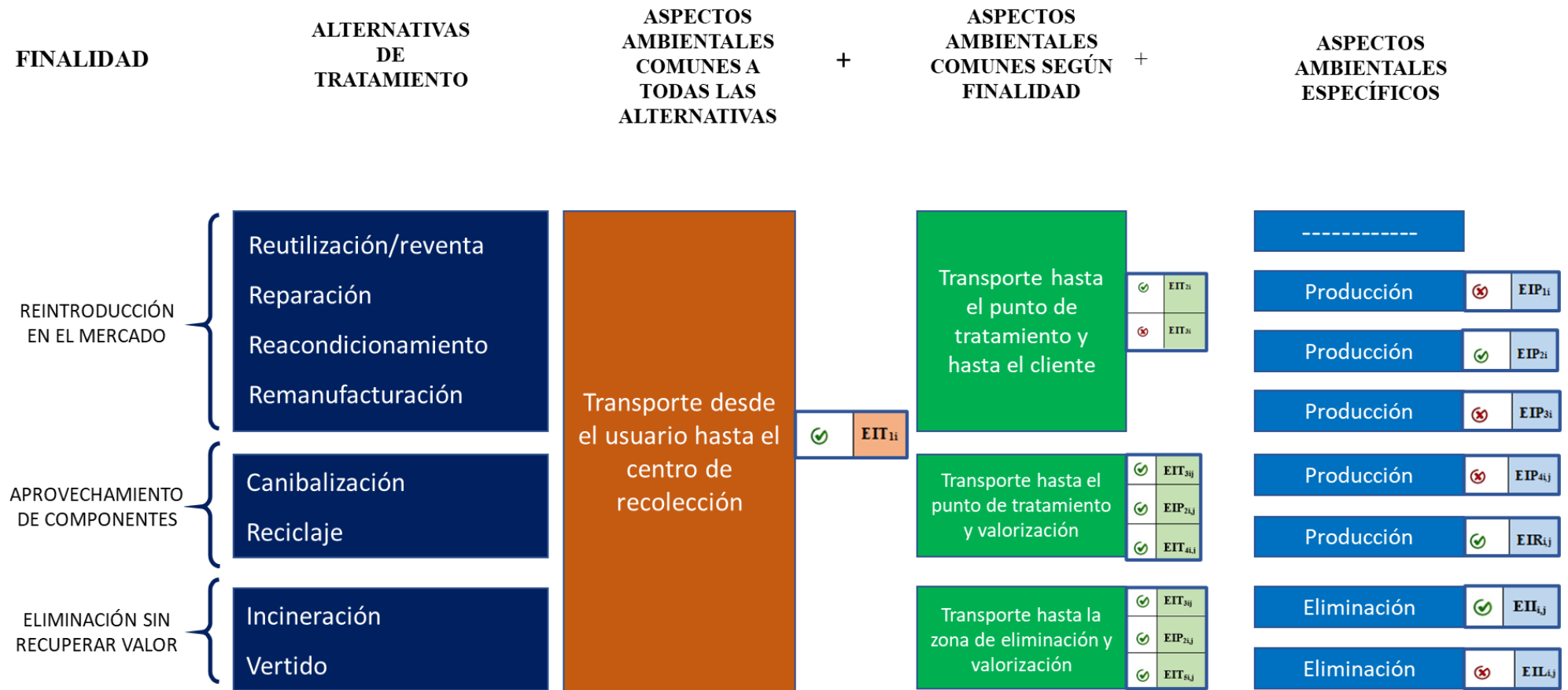


Figura 273. Combinación de la estructura de impacto ambiental con los parámetros ambientales aplicables al ejemplo (Elaboración propia)

15.2.2.3. *Parámetros sociales*

Siguiendo la estructura planteada en la identificación de los aspectos sociales a considerar en cada alternativa (apartado 9.3.3), se expone a continuación la estructura de aspectos sociales relacionados con las alternativas de LI:



**Figura 274.** Estructura de aspectos sociales relacionados con la LI con el desglose de los aspectos sociales comunes y específicos (Elaboración propia).

A continuación, se van a **revisar todos los posibles parámetros, relacionados con cada uno de los aspectos sociales de las alternativas de disposición de LI**, para ver cuáles procede considerar en el ejemplo de aplicación de los neumáticos usados porque sean aplicables y cuales no son considerados:

Parámetros sociales comunes a todas las alternativas:

Se considera común a todas las alternativas, el impacto social de las operaciones de destinadas a la recogida, categorización, almacén y venta del neumático (correspondiendo el parámetro  $W_{1i}$ ) por el factor regional de la zona de realización de dichas operaciones (correspondiendo al parámetro  $\mu_{1i}$ ).

Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado:

Todas las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado contempladas en el presente ejemplo de aplicación (reutilización en el mercado primario o secundario y reacondicionamiento) contarán con el impacto social dado por las operaciones de transporte del producto desde la empresa hasta el cliente final, correspondiendo el parámetro  $W_{2i}$ , por el factor regional de la zona de realización de dichas operaciones, correspondiendo al parámetro  $\mu_{2i}$ . En este ejemplo de aplicación, para diferenciar los mercados a los que se dirige el producto, se nombrará los parámetros del mercado primario como  $W_{2Ai} * \mu_{2Ai}$  y los parámetros del mercado secundario outlet como  $W_{2Bi} * \mu_{2Bi}$ .

Asimismo, todas las intervenciones sobre los productos que van a ser reintroducidos en el mercado se realizan en las mismas instalaciones, por tanto, el impacto social de transporte desde el centro de decisión hasta la zona en la que se interviene sobre el producto no se considera en el presente ejemplo de aplicación.

Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:

Se contempla como aspecto común a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, el transporte desde la planta de recogida hasta la planta de valorización. Dichas operaciones tienen asignado el siguiente parámetro:  $W_{3i} * \mu_{3i}$ . Además, para este tipo de alternativas, se contempla el impacto social propio de la valorización del neumático, correspondiéndole el parámetro  $W_{v_{ij}} * \mu_{v_{ij}}$ .

Además, las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes contarán con el impacto social dado por el transporte del componente desde la planta de valorización hasta el centro de intervención, o de reciclaje en este ejemplo  $W_{4ij} * \mu_{4ij}$ .

Parámetros sociales comunes a las alternativas de eliminación del producto sin recuperación de valor:

Del mismo modo que pasaba en los parámetros económicos y ambientales, las alternativas con la finalidad de eliminación del producto consideradas en el presente ejemplo de aplicación tienen en común los mismos parámetros que las alternativas con la finalidad del aprovechamiento de componentes que corresponden a la valorización del producto. Es decir, el parámetro social del transporte desde la planta de recogida y clasificación hasta la planta de valorización ( $W_{3i} * \mu_{3i}$ ) y el parámetro social de la valorización del producto ( $W_{v_{ij}} * \mu_{v_{ij}}$ ). Además, las alternativas con la finalidad de eliminación del producto contarán con el impacto social dado por el transporte del producto desde la planta de valorización hasta la planta de incineración ( $W_{5ij} * \mu_{5ij}$ ).

Parámetros sociales específicos a cada alternativa de disposición:

Respecto a las alternativas de disposición que no se contemplan en el ejemplo de aplicación (reparación, remanufactura, canibalización y vertido) evidentemente no se tienen en cuenta sus parámetros sociales específicos para este estudio.








Para las alternativas que, si están disponibles en el caso de los neumáticos usados, se considera el impacto social específico debido a las operaciones realizadas durante la intervención de reacondicionamiento del producto ( $W_{ref_i} * \mu_{ref_i}$ ). Asimismo, se considera el impacto social debido a las operaciones de reciclaje de cada componente ( $W_{rec_i} * \mu_{rec_{i,j}}$ ) o de incineración ( $W_{bur_i} * \mu_{bur_{i,j}}$ ), según la alternativa aplicada.

A continuación, se presenta la tabla genérica de los parámetros sociales (Tabla 58), coloreados según el código empleado en los apartados anteriores (verde – parámetros comunes según finalidad, marrón – parámetros comunes para todas las alternativas y azul – parámetros específicos para cada alternativa), con la indicación de si son aplicables o no para el presente ejemplo:

PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
✔	$W_{1i} * \mu_{1i}$	Horas de MO de las operaciones de recogida, categorización, almacén y venta del producto i * factor regional correspondiente
PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
✔	$W_{2i} * \mu_{2i}$	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado * factor regional correspondiente
✘	$W_{3i} * \mu_{3i}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del producto i desde el centro de decisión hasta el punto de intervención * factor regional correspondiente
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
✔	$W_{3i} * \mu_{3i}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente j del producto i a la planta de valorización * factor regional correspondiente ( <b>Se aprovecha el nombre del parámetro anterior que no se aplica en este ejemplo</b> )
✔	$W_{vij} * \mu_{vij}$	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente j del producto i * factor regional correspondiente
✔	$W_{4ij} * \mu_{4ij}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente j del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje * factor regional correspondiente
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperar valor		
✔	$W_{3i} * \mu_{3i}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente j del producto i a la planta de valorización * factor regional correspondiente
✔	$W_{vij} * \mu_{vij}$	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente j del producto i * factor regional correspondiente
✔	$W_{5ij} * \mu_{5ij}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente j del producto i desde la planta de valorización hasta la planta de incineración * factor regional correspondiente
PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

	<b><math>W_{rep_i} * \mu_{rep_i}</math></b>	Horas de MO de las operaciones de Reparación del producto i * factor regional correspondiente
	<b><math>W_{ref_i} * \mu_{ref_i}</math></b>	Horas de MO de las operaciones de Reacondicionamiento del producto i * factor regional correspondiente
	<b><math>W_{rem_i} * \mu_{rem_i}</math></b>	Horas de MO de las operaciones de Remanufacturaación del producto i * factor regional correspondiente
	<b><math>W_{can_{i,j}} * \mu_{can_{i,j}}</math></b>	Horas de MO de las operaciones de Canibalización del componente j del producto i * factor regional correspondiente
	<b><math>W_{rec_{i,j}} * \mu_{rec_{i,j}}</math></b>	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente j del producto i * factor regional correspondiente
	<b><math>W_{bur_{i,j}} * \mu_{bur_{i,j}}</math></b>	Horas de MO de las operaciones de Incineración del componente j del producto i * factor regional correspondiente
	<b><math>W_{dis_{i,j}} * \mu_{dis_{i,j}}</math></b>	Horas de MO de las operaciones de Vertido del componente j del producto i * factor regional correspondiente

**Tabla 58.** Parámetros sociales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

A continuación, se muestra una nueva figura (Figura 275) en la que se combina la estructura de impactos sociales con los parámetros sociales aplicables:





Figura 275. Combinación de la estructura de impacto social con los parámetros sociales aplicables al ejemplo (Elaboración propia)

### 15.2.3. Paso 3. Calcular valores asociados a cada parámetro de sostenibilidad.



El modelo matemático particular, planteado en el apartado anterior, se adapta al ejemplo de aplicación teniendo en cuenta los componentes del producto y las alternativas posibles. Para calcular los valores asociados a cada parámetro de sostenibilidad, en el caso de los neumáticos usados, se van a considerar tres componentes principales en el producto:

- Acero
- Fibra
- Caucho.

El presente ejemplo de aplicación se basa en un neumático pequeño, de un peso total de 7'5 kilogramos, donde la proporción de pesos se distribuye de la siguiente manera: Acero 20 % (1'5 kg), fibra 12 % (0'9 kg) y caucho 68% (5'1 kg). Dicha proporción será utilizada a lo largo del estudio para distribuir aquellos Datos, sobre el producto en su conjunto, entre los distintos componentes.

Los valores asociados son presentados a continuación, en base a un ejemplo genérico de neumático recuperado con los valores medio de todos los parámetros definidos en el apartado anterior.

#### 15.2.3.1. Valores económicos

Los valores económicos son obtenidos a través de la información que maneja la empresa sobre los ingresos y los costes asociados a los parámetros aplicables al presente ejemplo de aplicación. Se expresan a continuación los valores obtenidos según la clasificación de parámetros indicada en el modelo matemático:

##### Ingresos obtenidos por reintroducción en el mercado:

**Socai**, precio de venta del producto  $i$  por reutilización como neumático de Ocasión: **10 €/ud.**

**Sgomi**, precio de venta del producto  $i$  por reutilización como neumático de Gomilla: **4 €/ud.**

**Srefi**, precio de venta del producto  $i$  como neumático Recauchutado: **30 €/ud.**

Ingresos obtenidos por aprovechamiento de componentes:

Todas las alternativas no son aplicables a todos los componentes, por tanto, sólo se plantean los ingresos por venta para la alternativa de reciclaje de los siguientes componentes:

Acero:

$S_{reci1}$ , precio de venta del componente 1 (*acero*) obtenido del producto  $i$  por reciclaje, cifrado en 183 €/t, por tanto: **0'275 €/ud.**

Caucho:

$S_{reci3}$ , precio de venta del componente 3 (*caucho*) obtenido del producto  $i$  por reciclaje, cifrado en 265 €/t, por tanto: **1'352 €/ud.**

Ingresos obtenidos por eliminación sin recuperación de valor:

Todas las alternativas no son aplicables a todos los componentes, por tanto, sólo se plantean los ingresos por venta para la incineración de los siguientes componentes:

Fibra:

$S_{bur12}$ , precio de venta del componente 2 (*fibra*) obtenido del producto  $i$  para incineración. De la fibra no se cobra nada por incinerar e incluso pagas una sanción de 12 €/t (0'011 €/ud) si no se llega a incinerar. En este caso, se considera que, efectivamente se incinera, por tanto, se sitúa el valor de: **0 €/ud.**

Caucho:

$S_{bur13}$ , precio de venta del componente 3 (*caucho*) obtenido del producto  $i$  para incineración, cifrado en 30 €/t, por tanto: **0'153 €/ud.**

Otros ingresos:

$SUB_{ij}$ , subvención obtenida por gestión del componente  $j$  obtenido del producto  $i$ . En este estudio de caso, existe un input de unos 50 €/t de neumático para la planta de valorización. Debido a que este ingreso se debe contemplar para todas las alternativas, se especificará en su valor global (**0'375 €/ud**) para las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado o según la proporción de los componentes sobre el producto final para las alternativas de

tratamiento de componentes: **0'075 €/ud para el acero, 0'045 €/ud para la fibra y 0'255 €/ud para el caucho.**

Costes Comunes a todas las alternativas de tratamiento:

**CT<sub>1i</sub>**, coste de transporte del producto *i* desde el cliente hasta la planta distribuidora/clasificadora. En este caso, se calcula un coste entre 50 y 56 €/t, por lo que cogiendo un valor medio de 53 €/t, aporta un valor de **0'398 €/ud.**

**CIS<sub>i</sub>**, coste de inspección y clasificación del producto *i*. En este ejemplo, dicho coste incluye también la recogida y el almacenaje previo del producto antes de la inspección y clasificación. En este sentido, dicho coste está cifrado en la siguiente cantidad: **0'11 €/ud.**

Costes Comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado

**COP<sub>i</sub>**, coste de embalaje, o puesta a punto, del producto *i* para reutilización o reventa. Se entiende por este coste, la colocación del stock en el almacén, para poder sacarlos posteriormente al mercado. En este objeto de estudio, dicho coste se encuentra cifrado en: **0'25 €/ud.**

**CS<sub>1i</sub>**, coste de almacenaje del producto *i* antes de la reutilización o reventa. El coste del almacenaje está cifrado en 0'2 €/mes por unidad. Siendo el tiempo medio de permanencia del neumático en el almacén de 2 meses, el coste de almacenaje se sitúa en: **0'4 €/ud.**

**CT<sub>2i</sub>**, coste de transporte del producto *i* desde la empresa hasta el nuevo cliente. Según la alternativa de tratamiento escogida, el nuevo cliente será diferente, ya que el neumático de “ocasión” va destinado al mercado nacional, el neumático de “gomilla” va destinado a una gran variedad de países extranjeros muy concretos y el neumático de “carcasa” llega al nuevo cliente, nacional o europeo, desde la planta recauchutadora, que está situada en la provincia de Alicante.

A continuación, en la Tabla 59, se exponen los datos de transporte utilizados en el estudio, correspondientes en cada alternativa: (se considera 1 €/km)

## PARTE V. APLICACIÓN.

### Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

Alternativa	Destino	Distancia	Tipo de Transporte	Coste transporte
Ocasión	Nacional	100 Km	Camión 2T	0'375 €/ud
Gomilla	Extranjero	1.020 Km	Camión 13T (220Km) + Barco contenedor 40pies (8000 Km)	0'794 €/ud
Carcasa	Valencia – Alicante	200 Km	Camión 13T	0'692 €/ud
	Nacional – Europeo	1000 Km		

**Tabla 59.** Datos de transporte utilizados en el ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

Debido a que dicho coste es bastante variable entre las alternativas y muy importante a la hora de considerar los costes de cada alternativa, se introducirá dicho coste como parte del coste específico de cada alternativa, según como se aprecia en el apartado de costes específicos de cada alternativa.

#### Costes Comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:

**CT<sub>3ij</sub>**, coste de transporte del componente *j* del producto *i* desde de la planta de recogida y clasificación hasta la planta de valorización. Se considera una distancia de 280 km y el tipo de transporte medio es con un camión de 13t, por tanto, el coste del transporte se sitúa en  $280 \text{ €}/13\text{t} = 21'538 \text{ €/t}$ . Puesto que se calculan 133'33 uds/t, el coste por unidad sería de 0'162 €. Distribuido entre la proporción de los componentes del producto final, el coste por unidad correspondiente a cada componente sería el siguiente:

**Acero: 0'032 €/ud**

**Fibra: 0'019 €/ud**

**Caucho: 0'110 €/ud**

**CL<sub>ij</sub>**, coste de troceado del producto *i* en componentes *j* antes de ser destinado para reciclaje o incineración (**valorización Fase I**). Este coste de la primera fase de la valorización incluye la recepción, alimentación de la máquina el troceado y un primer almacenaje. Estas acciones están cifradas en 45 €/t, por tanto, distribuido proporcionalmente entre los componentes, quedaría de la siguiente manera:

**Acero: 0'068 €/ud**

**Fibra: 0'041 €/ud**

**Caucho: 0'230 €/ud**

CS<sub>2ij</sub>, coste de granulado (**valorización Fase II**) del producto *i* en componentes *j* antes de ser destinado para reciclaje o incineración. El coste de la segunda fase de la valorización incluye el transporte interno, la separación de componentes, el ensacado, almacenaje y carga de los componentes para transportarlos a su nuevo destino. Estas acciones están cifradas en 52 €/t, por tanto, distribuido proporcionalmente entre los componentes, quedaría de la siguiente manera:

**Acero: 0'078 €/ud**

**Fibra: 0'047 €/ud**

**Caucho: 0'265 €/ud**

CT<sub>4ij</sub>, coste de transporte específico de reciclaje del componente *j* del producto *i*

En el caso del acero (Componente 1) se considera un transporte de 500 Km con un camión de 24t, a razón de 500€/24t, dando 20'833 €/t. Teniendo en cuenta que el peso medio del acero en un neumático es de 1'5 kg, el coste del citado transporte será de **0'031 €/ud**.

El reciclaje del caucho (componente 3) se lleva a cabo en una gran variedad de destinos, entre nacionales e internacionales. Generalmente el 60% se transporta a destinos nacionales y el 40% se exporta a 18 países. En este sentido, se cifra el transporte a una distancia de 1000 km con un camión de 13T. Teniendo en cuenta que, para cada neumático, hay unos 5'10 kg de caucho, el coste del transporte del caucho hasta la planta de reciclaje será de **0'392 €/ud**.

Costes Comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:

Las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor, la incineración en este ejemplo, cuentan con los mismos costes comunes que las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, en cuanto al coste de transporte del componente *j* del producto *i* antes de ser desensamblado (CT<sub>3ij</sub>), coste de troceado del producto *i* en componentes *j* antes de ser destinado para reciclaje o incineración (CL<sub>ij</sub> - **valorización Fase I**) y coste de granulado

(CS2<sub>ij</sub>, - **valorización Fase II**) del producto *i* en componentes *j* antes de ser destinado para reciclaje o incineración.

CT5<sub>ij</sub>, coste de transporte del componente *j* del producto *i* después de ser desensamblado para ser incinerado.

El caso de la fibra (Componente 2) se considera un transporte de 400 Km, hasta la provincia de Madrid, con un camión de 13t, a razón de 400€/13t, dando 30'769 €/t. Teniendo en cuenta que el peso medio de la fibra en un neumático es de 0'9 kg, el coste del citado transporte será de **0'028 €/ud.**

La incineración del caucho (componente 3) se realiza en la provincia de Madrid, considerando una distancia de 400 km, con un camión de 24t. Teniendo en cuenta que, para cada neumático, hay unos 5'10 kg de caucho, el coste del transporte del caucho hasta la planta de incineración será de **0'085 €/ud.**

#### Costes específicos de cada alternativa de reintroducción en el mercado

**Coca<sub>i</sub>**, coste específico de la alternativa de “ocasión” del producto *i*. Se considera como coste específico de dicha alternativa, el coste del transporte desde la planta clasificadora hasta el nuevo cliente: **0'375 €/ud.**

**Cgomi**, coste específico de la alternativa de “gomilla” del producto *i*. Se considera como coste específico de dicha alternativa, el coste del transporte desde la planta clasificadora hasta el nuevo cliente: **0'794 €/ud.**

**Crefi**, coste de recauchutado del producto *i*. Se considera como coste específico de esta alternativa, el coste de adquisición del producto por parte de la planta recauchutadora a la planta de recogida y clasificación, por importe de 1'8 €/ud, el coste de la operación de recauchutado de cada neumático, cifrado en 13 €/ud, y el coste del transporte desde la planta de clasificación hasta la planta de recauchutado y desde esta al cliente final, por valor de 0'692 €/ud. Por tanto, el coste específico para la alternativa de “carcasa” será de: **14'492 €/ud.**

#### Costes Específicos a la alternativa de reciclaje

**Crec<sub>ij</sub>**, coste de reciclaje del componente *j* del producto *i*, cifrado en un valor muy pequeño, por la gran cantidad de material que se maneja y el escaso volumen que le corresponde a cada componente por neumático (**0'001 €/ud.**).

Costes Específicos a la alternativa de incineración

$C_{bur,i,j}$  y  $C_{rm,i,j}$ , costes de incineración y de gestión de los residuos del componente  $j$  del producto  $i$ , no son considerados en el objeto de estudio, ya que se asumen por parte de la planta incineradora y no se tienen en cuenta para los ingresos.

A continuación, se muestra una tabla resumen (Tabla 60) donde se indican los valores referidos a los parámetros económicos aplicables al ejemplo de aplicación. Los parámetros son coloreados según el ámbito de aplicación (verde – parámetros comunes según finalidad, marrón – parámetros comunes para todas las alternativas y azul – parámetros específicos para cada alternativa).

INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>Soca<sub>i</sub></b>	10 €/ud	ingresos por reutilización del producto $i$ como neumático de ocasión
<b>Sgom<sub>i</sub></b>	4 €/ud	ingresos por reutilización del producto $i$ neumático de gomilla
<b>Sref<sub>i</sub></b>	30 €/ud	ingresos por reacondicionamiento del producto $i$
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Srec<sub>i,1</sub></b>	0'275 €/ud	ingresos por reciclaje del componente 1 (acero) obtenido del producto $i$
<b>Srec<sub>i,3</sub></b>	1'352 €/ud	ingresos por reciclaje del componente 3 (caucho) obtenido del producto $i$
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:		
<b>Sbur<sub>i,2</sub></b>	0 €/ud	ingresos por incineración del componente 2 (fibra) obtenido de producto $i$
<b>Sbur<sub>i,3</sub></b>	0'153 €/ud	ingresos por incineración del componente 3 (caucho) obtenido de producto $i$
OTROS INGRESOS COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
<b>SUB<sub>i</sub></b>	0'375 €/ud	ingresos obtenidos por subvención de gestión del producto $i$
<b>SUB<sub>i,1</sub></b>	0'075 €/ud	ingresos obtenidos por subvención de gestión del componente 1 (acero) obtenido del producto $i$



PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

<b>SUB<sub>i,2</sub></b>	0'045 €/ud	ingresos obtenidos por subvención de gestión del componente 2 (fibra) obtenido del producto i
<b>SUB<sub>i,3</sub></b>	0'255 €/ud	ingresos obtenidos por subvención de gestión del componente 3 (caucho) obtenido del producto i
<b>COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>CT<sub>ii</sub></b>	0'398 €/ud	coste de transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa
<b>CIS<sub>i</sub></b>	0'11 €/ud	coste de inspección y clasificación del producto i
<b>COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>COP<sub>i</sub></b>	0'25 €/ud	coste de embalaje del producto i para reutilización o reventa
<b>CS<sub>ii</sub></b>	0'4 €/ud	coste de almacenaje del producto i antes de la reutilización o reventa
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>CT<sub>3i,1</sub></b>	0'032 €/ud	coste de transporte del componente 1 (acero) del producto i antes de ser desensamblado para reciclaje
<b>CT<sub>3i,3</sub></b>	0'110 €/ud	coste de transporte del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser desensamblado para reciclaje
<b>CL<sub>i,1</sub></b>	0'068 €/ud	coste de troceado del componente 1 (acero) del producto i antes de ser destinado para reciclaje o incineración ( <b>valorización Fase I</b> )
<b>CL<sub>i,3</sub></b>	0'230 €/ud	coste de troceado del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser destinado para reciclaje ( <b>valorización Fase I</b> )
<b>CS<sub>2i,1</sub></b>	0'078 €/ud	coste de granulado del componente 1 (acero) del producto i después de ser desensamblado para reciclaje ( <b>valorización Fase II</b> )
<b>CS<sub>2i,3</sub></b>	0'265 €/ud	coste de granulado del componente 3 (caucho) del producto i después de ser desensamblado para reciclaje ( <b>valorización Fase II</b> )
<b>CT<sub>4i,1</sub></b>	0'031 €/ud	coste de transporte específico de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i
<b>CT<sub>4i,3</sub></b>	0'392 €/ud	coste de transporte específico de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

Costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:		
<b>CT<sub>3i,2</sub></b>	0'019 €/ud	coste de transporte del componente 2 (fibra) del producto i antes de ser desensamblado para incineración
<b>CT<sub>3i,3</sub></b>	0'110 €/ud	coste de transporte del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser desensamblado para incineración
<b>CL<sub>i,2</sub></b>	0'041 €/ud	coste de troceado del componente 2 (fibra) del producto i antes de ser destinado para incineración ( <b>valorización Fase I</b> )
<b>CL<sub>i,3</sub></b>	0'230 €/ud	coste de troceado del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser destinado para incineración ( <b>valorización Fase I</b> )
<b>CS<sub>2i,2</sub></b>	0'047 €/ud	coste de granulado del componente 2 (fibra) del producto i después de ser desensamblado para incineración ( <b>valorización Fase II</b> )
<b>CS<sub>2i,3</sub></b>	0'265 €/ud	coste de granulado del componente 3 (caucho) del producto i después de ser desensamblado para incineración ( <b>valorización Fase II</b> )
<b>CT<sub>5i,2</sub></b>	0'028 €/ud	coste de transporte específico de incineración del componente 2 (fibra) del producto i
<b>CT<sub>5i,3</sub></b>	0'085 €/ud	coste de transporte específico de incineración del componente 3 (caucho) del producto i
COSTES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
<b>Coca<sub>i</sub></b>	0'375 €/ud	costes por reutilización del producto i como neumático de ocasión
<b>Cgom<sub>i</sub></b>	0'794 €/ud	costes por reutilización del producto i neumático de gomilla
<b>Cref<sub>i</sub></b>	14'492 €/ud	coste de reacondicionamiento del producto i
<b>Crec<sub>i,1</sub></b>	0'001 €/ud	coste de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i
<b>Crec<sub>i,3</sub></b>	0'001 €/ud	coste de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i
<b>Cbur<sub>i,j</sub></b>	0 €/ud	coste de incineración del componente j del producto i
<b>Crm<sub>i,j</sub></b>	0 €/ud	coste de gestión de los residuos del componente j del producto i

Tabla 60. Valores económicos aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

**Valores de rentabilidad económica para cada Alternativa.**

El valor de la rentabilidad económica de cada alternativa de disposición se obtiene como la diferencia entre los ingresos y los costes referentes a cada una de ellas, tal y como se ha expuesto en el apartado 9.3.1. Para facilitar el seguimiento de los valores de rentabilidad de cada alternativa, se expone en la figura siguiente (Figura 276) el desglose de ingresos y costes que componen la rentabilidad de las alternativas de LI:

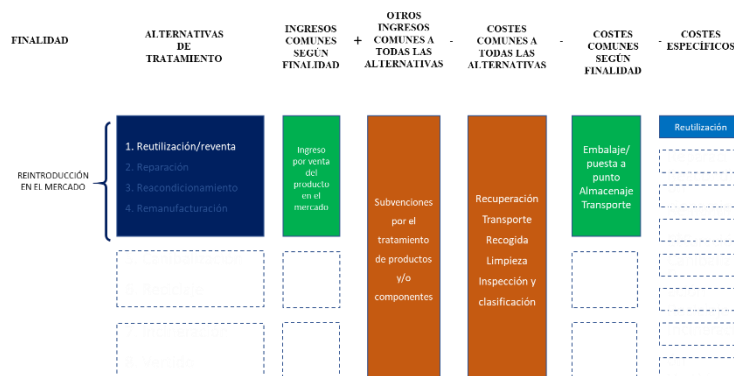


**Figura 276.** Estructura de ingresos y costes que componen la rentabilidad económica de las alternativas de LI (Elaboración propia).

A continuación, se mostrará los parámetros económicos que hacen referencia a cada alternativa y sus valores correspondientes, obteniendo el valor de la rentabilidad económica de cada alternativa. Asimismo, se acompaña en cada alternativa una miniatura de la imagen anterior, destacando los parámetros aplicables a la alternativa en cuestión:

**3. Alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:**

o **Reutilización como neumático de ocasión.**

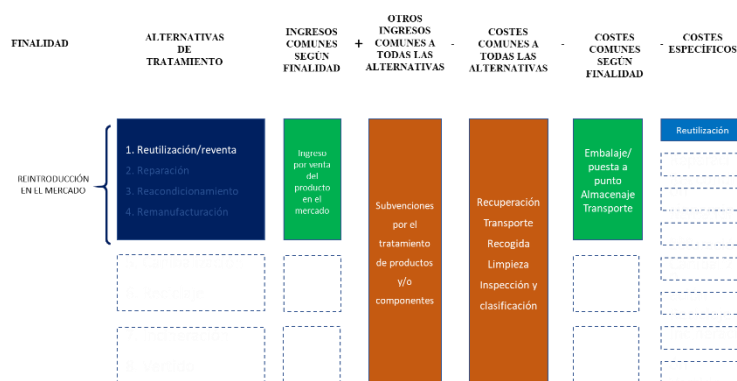


Los ingresos económicos que corresponden a esta alternativa vienen dados por el ingreso por venta del producto en el mercado ( $Socai=10 \text{ €/ud}$ ) más el ingreso obtenido mediante

la subvención por tratamiento del neumático usado ( $SUB_i=0'375 \text{ €/ud}$ ). Asimismo, los costes referentes a la alternativa de reutilización vienen dados por los costes comunes a todas las alternativas ( $CT_{li}=0'398 \text{ €/ud}$  y  $CIS_i=0'11 \text{ €/ud}$ ), los costes comunes según la finalidad de reintroducción en el mercado ( $COP_i=0'25 \text{ €/ud}$  y  $CS_{li}=0'4 \text{ €/ud}$ ) y los costes específicos de la alternativa de reutilización como neumático de ocasión ( $Coca_i=0'375 \text{ €/ud}$ ). De esta manera, el valor de la rentabilidad económica (EP) de la alternativa de reutilización como neumático de ocasión será de:

$$\underline{EP_{OCAi} = Socai + SUB_i - CT_{li} - CIS_i - COP_i - CS_{li} - Coca_i = 8'842 \text{ €/ud}}$$

o **Reutilización como neumático de gomilla.**



Del mismo modo que en la alternativa anterior, los ingresos económicos que corresponden a esta alternativa vienen dados por el precio de venta del producto en el mercado ( $Sgom_i = 4 \text{ €/ud}$ ) más el

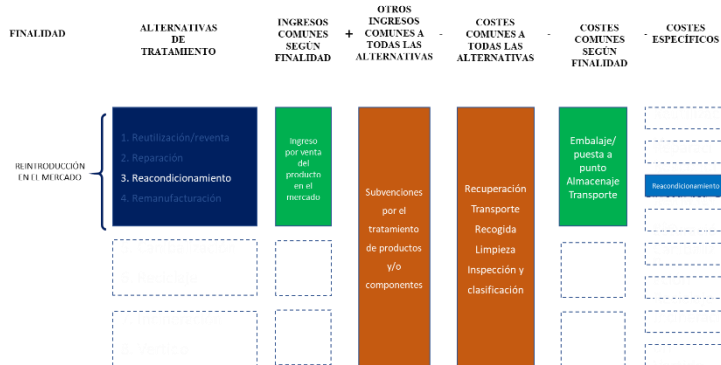
ingreso obtenido mediante la subvención por tratamiento del neumático usado ( $SUB_i=0'375 \text{ €/ud}$ ). Asimismo, los costes de la alternativa de reutilización como neumático de gomilla son los mismos que la alternativa anterior y vienen dados por los costes comunes a todas las alternativas ( $CT_{li}=0'398 \text{ €/ud}$  y  $CIS_i=0'11 \text{ €/ud}$ ), los costes comunes según la finalidad de reintroducción en el mercado ( $COP_i=0'25 \text{ €/ud}$  y  $CS_{li}=0'4 \text{ €/ud}$ ) y los costes específicos de la alternativa de reutilización como neumático de ocasión ( $Cgom_i=0'794 \text{ €/ud}$ ). De esta manera, el valor de la rentabilidad económica de la alternativa de reutilización como neumático gomilla será de:

$$\underline{EP_{GOMi} = Sgom_i + SUB_i - CT_{li} - CIS_i - COP_i - CS_{li} - Cgom_i = 2'423 \text{ €/ud}}$$

o **Reacondicionamiento.**

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

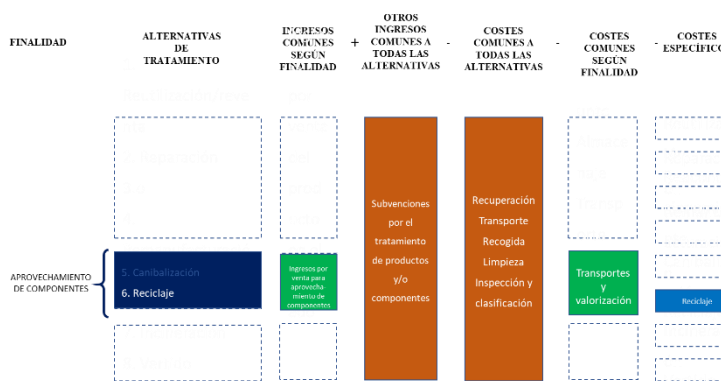


Los ingresos económicos que corresponden a esta alternativa vienen dados por el precio de venta del neumático tras haber sido reacondicionado ( $S_{refi} = 30 \text{ €/ud}$ ) más el ingreso obtenido mediante la

subvención por tratamiento del neumático usado ( $SUB_i = 0'375 \text{ €/ud}$ ). Asimismo, los costes de la alternativa de reacondicionamiento del neumático vienen dados por los costes comunes a todas las alternativas ( $CT_{1i} = 0'398 \text{ €/ud}$  y  $CIS_i = 0'11 \text{ €/ud}$ ), los costes comunes según la finalidad de reintroducción en el mercado ( $COP_i = 0'25 \text{ €/ud}$  y  $CS_{1i} = 0'4 \text{ €/ud}$ ) y los costes específicos de la alternativa de reacondicionamiento ( $C_{refi} = 14'492 \text{ €/ud}$ ). De esta manera, el valor de la rentabilidad económica de la alternativa de reacondicionamiento será de:

$$EP_{REFi} = S_{refi} + SUB_i - CP_i - CT_{1i} - CIS_i - COP_i - CS_{1i} - C_{refi} = 14'725 \text{ €/ud}$$

4. Alternativas con la finalidad de aprovechamiento de Componentes.



Dentro del presente ejemplo de aplicación, el reciclaje del componente 1 (acero) y del componente 3 (caucho), son las únicas alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes viables. El

primer parámetro para cuantificar la rentabilidad económica de dichas alternativas es el ingreso obtenido por reciclar cada componente:

- **Acero.** Se contempla el ingreso por reciclaje ( $S_{rec1} = 0'275 \text{ €/ud}$ ) más el correspondiente ingreso obtenido mediante la subvención por el tratamiento de los neumáticos usados, repartido según la proporción del componente en el producto ( $SUB_{i1} = 0'075 \text{ €/ud}$ ).

(3) **Acero.** Se contempla el ingreso por reciclaje ( $S_{reci3} = 1'352 \text{ €/ud}$ ) más el correspondiente ingreso obtenido mediante la subvención por el tratamiento de los neumáticos usados, repartido según la proporción del componente en el producto ( $SUB_{i3} = 0'255 \text{ €/ud}$ ).

El resto de los parámetros económicos considerados para determinar la rentabilidad de la alternativa de reciclaje, son **los costes que hacen referencia a dicha alternativa**. En este caso, se agrupan, por un lado, en aquellos que son **comunes a todas las alternativas de disposición**, por otro lado, en aquellos que **son comunes sólo a las alternativas con dicha finalidad** y, por último, aquellos que **son específicos de cada alternativa**. Los costes que son comunes a todas las alternativas son calculados como costes por unidad del producto ( $CT_{1i} = 0'398 \text{ €/ud}$  y  $CIS_i = 0'11 \text{ €/ud}$ ) y deben estar presentes en su totalidad en cualquier combinación de alternativas de componentes. Por ello, como en toda alternativa que combine tratamiento de componentes se debe elegir una alternativa para cada componente, para poder calcular la rentabilidad económica en las alternativas que hacen referencia a los componentes, dichos valores son **distribuidos en función de la proporción de cada componente sobre el producto (20% componente 1, 12% componente 2 y 68% componente 3)**.

Los costes que son comunes sólo a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, ( $CT_{3ij}$ ,  $CL_{ij}$  y  $CS_{2ij}$ ), también **se reparten entre los componentes en función del porcentaje del peso del componente**, ya que en función del volumen y del peso de cada componente, el coste será diferente. Además, cabe añadirle el coste de transporte desde la planta de valorización hasta la planta de reciclaje correspondiente ( $CT_{4ij}$ ) más los costes específicos correspondientes al reciclaje del componente ( $C_{recij}$ ).

De este modo, los valores de rentabilidad, desglosados por componente, quedarían de la siguiente manera:

c) **Reciclaje.**

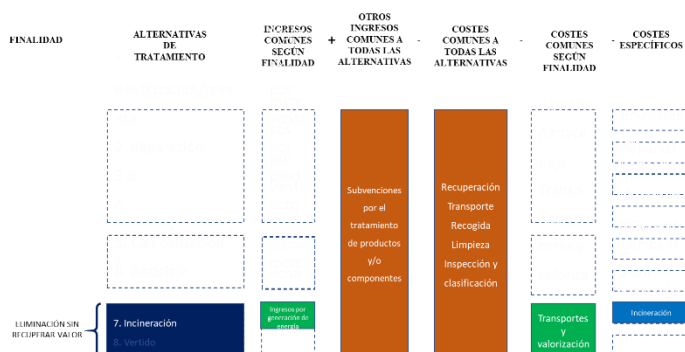
(1) **Acero:**

$$\underline{EP_{reci1} = S_{reci1} + SUB_{i1} - (CT_{1i} - CIS_i) * 0'2 - CT_{3i1} - CL_{i1} - CS_{2i1} - CT_{4i1} - C_{reci1} = 0'038 \text{ €/ud}}$$

(3) Caucho:

$$EP_{reci3} = S_{reci3} + SUB_{i3} - (CT_{1i} - CIS_i) * 0'68 - CT_{3i3} - CL_{i3} - CS_{2i3} - CT_{4i3} - C_{reci3} = 0'264 \text{ €/ud}$$

5. Alternativas con la finalidad de eliminación del producto.



Dentro del presente ejemplo de aplicación, la incineración del componente 2 (fibra) y del componente 3 (caucho), son las únicas alternativas con la finalidad de eliminación del producto viables. El primer parámetro para cuantificar la

rentabilidad económica de dichas alternativas es **el ingreso obtenido por incinerar cada componente**. Según cada componente, los ingresos obtenidos varían de la siguiente manera:

(2) **Fibra.** Se contempla el ingreso por incineración de la fibra, aunque sea nulo en este ejemplo de aplicación ( $S_{bur12} = 0 \text{ €/ud}$ ), más el correspondiente ingreso obtenido mediante la subvención por el tratamiento de los neumáticos usados, repartido según la proporción del componente en el producto ( $SUB_{i2} = 0'045 \text{ €/ud}$ ).

(3) **Acero.** Se contempla el ingreso por incineración del caucho ( $S_{bur13} = 0'255 \text{ €/ud}$ ) más el correspondiente ingreso obtenido mediante la subvención por el tratamiento de los neumáticos usados, repartido según la proporción del componente en el producto ( $SUB_{i3} = 0'255 \text{ €/ud}$ ).

El resto de los parámetros económicos considerados para determinar la rentabilidad de la alternativa de incineración, son **los costes que hacen referencia a dicha alternativa**. En este caso, se agrupan, por un lado, en aquellos que son **comunes a todas las alternativas de disposición**, por otro lado, en aquellos que **son comunes sólo a las alternativas con la finalidad de eliminación** y, por último, aquellos que **son específicos de la alternativa**. Los costes que son comunes a todas las alternativas son calculados como costes por unidad del producto ( $CT_{1i} = 0'398 \text{ €/ud}$  y  $CIS_i = 0'11 \text{ €/ud}$ ) y deben

estar presentes en su totalidad en cualquier combinación de alternativas de componentes. Por ello, para poder calcular la rentabilidad económica en las alternativas que hacen referencia a los componentes, dichos valores son **distribuidos equitativamente entre los distintos componentes.**

Los costes que son comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto, ( $CT_{3ij}$ ,  $CL_{ij}$  y  $CS_{2ij}$ ), **se reparten entre los componentes en función del porcentaje del peso del componente**, ya que en función del volumen y del peso de cada componente, el coste será diferente. Además, cabe añadirle el coste de transporte desde la planta de valorización hasta la planta de incineración correspondiente ( $CT_{5ij}$ ) más los costes específicos correspondientes a la incineración del componente ( $Cbur_{ij}$ ).

De este modo, los valores de rentabilidad, desglosados por componente, quedarían de la siguiente manera:

**a) Incineración.**

**(2) Fibra:**

$$\underline{EP_{i2bur} = Sbur_{i2} + SUB_{i2} - (CT_{1i} - CIS_i) \cdot 0'12 - CT_{3i2} - CL_{i2} - CS_{2i2} - CT_{5i2} - Cbur_{i2} = - 0'151 \text{ €/ud}}$$

**(3) Caucho:**

$$\underline{EP_{i3bur} = Sbur_{i3} + SUB_{i3} - (CT_{1i} - CIS_i) \cdot 0'68 - CT_{3i3} - CL_{i3} - CS_{2i3} - CT_{5i3} - Cbur_{i3} = - 0'627 \text{ €/ud}}$$

A continuación, se muestra una tabla resumen (Tabla 29) con los valores de rentabilidad económica de cada una de las alternativas de disposición:

<b>Valores de rentabilidad económica correspondiente a cada alternativa:</b>		
<b>EP<sub>OCAi</sub></b>	8'842 €/ud	rentabilidad económica debido a la reintroducción en mercado primario del producto i
<b>EP<sub>GOMi</sub></b>	2'423 €/ud	rentabilidad económica debido a la reintroducción en mercado secundario del producto i
<b>EP<sub>REFi</sub></b>	14'725 €/ud	rentabilidad económica debido a la reintroducción del producto en el mercado primario tras el reacondicionamiento del producto i



## PARTE V. APLICACIÓN.

### Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

<b>EP<sub>RECI1</sub></b>	0'038 €/ud	rentabilidad económica debido al reciclaje del componente 1 acero del producto i
<b>EP<sub>RECI3</sub></b>	0'264 €/ud	rentabilidad económica debido al reciclaje del componente 3 caucho del producto i
<b>EP<sub>BURI2</sub></b>	-0'151 €/ud	rentabilidad económica debido a la incineración del componente 2 fibra del producto i
<b>EP<sub>BURI3</sub></b>	-0'627 €/ud	rentabilidad económica debido a la incineración del componente 3 caucho del producto i

**Tabla 61.** Valores de rentabilidad económica correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia).

#### 15.2.3.2. Valores ambientales

Los valores ambientales, se obtienen utilizando el software libre Open LCA, tal y como se ha justificado en el capítulo 11. Para el presente ejemplo de aplicación, se ha utilizado la versión 1.8 en la opción de 64 bits, con fecha de lanzamiento en febrero de 2019.

La BBDD insertada en el programa para obtener los valores ambientales es la “ELCD 3.2 *greendelta* v2\_18” y los datos correspondientes al método de impacto utilizado se obtienen a través de la BBDD “*Ecoinvent 3.5 LCIA methods*”.

Los valores ambientales obtenidos, se han conseguido a través de las valoraciones de impacto final total del método “*ReCiPe Endpoint (H,A)*”. Tal y como se justificó en el capítulo 8, el objetivo principal del método ReCiPe es proporcionar un método que combina el Eco-Indicador 99 y el método CML, en una versión actualizada, aportando niveles de indicadores de punto final que ofrecen un valor total en base a las siguientes categorías: daños a la salud humana, daños a los ecosistemas y daños a la disponibilidad de recursos.

El método *Recipe Endpoint HA*, ofrece un valor total para la comparativa, más actualizado y consensuado que el Ecoindicador 99 y desde un enfoque jerárquico (versión H,A), ya que la perspectiva de tiempo que ofrece está equilibrada entre plazos largos y cortos de tiempo y cuenta con una inclusión de perspectivas basadas en el consenso. Además, la perspectiva jerárquica es la que se determina por defecto en el programa, por tanto, se entiende como la versión más consensuada.

Parámetros ambientales comunes a todas las alternativas:

**EIT<sub>1i</sub>** impacto ambiental del transporte del producto *i* desde el cliente hasta la empresa. Se considera como transporte medio en estos casos, la realización **de 60 km con 4T, con un camión lleno con un contenedor de 36m<sup>3</sup>**. Para ello, se introduce como entrada, el transporte correspondiente en un camión de 17'3 t máximo, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 277):

Inputs					
Flow	Category	Amou...	Unit	Uncertainty	Provider
F <sub>2</sub> transport in t*km	Transport services/Oth...	7.5*60	kg*km	none	P Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER

Outputs									
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Rev...	Uncertainty	Avoided p...	Provider	Data quali...	Descript...
F <sub>2</sub> NEUMÁTICO DE OCASIÓN		1.00000	Item(s)		none				

**Figura 277.** Entrada de datos de factores de impacto ambiental EIT<sub>1i</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0,0000809354 puntos**, como se puede apreciar en la siguiente figura, extraída del apartado de árbol de contribuciones del análisis de resultados del proceso definido anteriormente.

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P NEUMÁTICO DE OCASIÓN	8.09354E-5	points
> 100.00%	P Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	8.09354E-5	points

**Figura 278.** Valores obtenidos de impacto ambiental EIT<sub>1i</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado:

Aunque en este punto, el tipo de impacto ambiental es el mismo para las distintas alternativas que reintroducen el producto en el mercado, se considera un impacto ambiental propio de cada alternativa porque el transporte correspondiente a cada una de ellas es muy diferente al de las demás alternativas.

**EIT<sub>2Ai</sub>** impacto ambiental del transporte del producto *i* desde la planta de recogida y clasificación hasta el nuevo cliente, para un **producto “ocasión”**. En esta alternativa se plantea un transporte medio de **2 toneladas durante 100 km, en un camión pequeño tipo furgoneta de 3'5 t**.

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

Inputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Provider
F <sub>e</sub> transport in t*km	Transport services/Other transport	7.5*100	kg*km	P Small lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 7,5 t total weight, 3,3 t max payload - RER

Outputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided pro...	Provider
F <sub>e</sub> NEUMÁTICO DE OCASIÓN		1.00000	Item(s)		none		

Figura 279. Entrada de datos de factores de impacto ambiental EIT<sub>2Ai</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00031 puntos**.

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P NEUMÁTICO DE OCASIÓN	0.00031	points
> 100.00%	P Small lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 7,5 t total weight, 3,3 t max payload - RER	0.00031	points

Figura 280. Valores obtenidos de impacto ambiental EIT<sub>2Ai</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

EIT<sub>2Bi</sub> impacto ambiental del transporte del producto *i* desde la planta de recogida y clasificación hasta el nuevo cliente, para un **producto “gomilla”**. En esta alternativa se plantea un transporte medio de **13 toneladas durante 8020 km, 220 km en un camión y 8000 km en barco.**

Flow	Category	Amount	Unit	Provider
F <sub>e</sub> transport in t*km	Transport services/Other transport	7.5*220	kg*km	P Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER
F <sub>e</sub> transport in t*km	Transport services/Other transport	7.5*8000	kg*km	P Container ship ocean, technology mix, 27.500 dwt pay load capacity - RER

Outputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided prod...	Provider
F <sub>e</sub> NEUMÁTICO DE OCASIÓN		1.00000	Item(s)		none		

Figura 281. Entrada de datos de factores de impacto ambiental EIT<sub>2Bi</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de 0'0030 puntos para el 220 km en camión, y 0'01548 puntos para el recorrido en barco, dando un total de **0'01578 puntos**.

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P NEUMÁTICO DE OCASIÓN	0.01578	points
> 98.12%	P Container ship ocean, technology mix, 27.500 dwt pay load capacity - RER	0.01548	points
> 01.88%	P Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	0.00030	points

Figura 282. Valores obtenidos de impacto ambiental EIT<sub>2Bi</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

EIT<sub>2ci</sub> impacto ambiental del transporte del producto *i* desde planta de recogida y clasificación hasta la planta recauchutadora y desde esta hasta el nuevo cliente, para un **producto “carcasa”**. En esta alternativa se plantea un transporte medio de **13 toneladas durante 1200 km, en un camión completo de 13t.**

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

Inputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Provider	Data quality ent...		
F <sub>2</sub> transport in t*km	Transport services/Other transport	7,5*1200	kg*km	P Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER			
Outputs							
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided product	Provider
F <sub>2</sub> NEUMÁTICO DE OCASIÓN		1.00000	Item(s)		none		

Figura 283. Entrada de datos de factores de impacto ambiental EIT<sub>2Ci</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00162 puntos**.

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P NEUMÁTICO DE OCASIÓN	0.00162	points
> 100.00%	P Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	0.00162	points

Figura 284. Valores obtenidos de impacto ambiental EIT<sub>2Ci</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:

EIT<sub>3ij</sub>, impacto ambiental del transporte del producto *i* desde la planta de recogida y clasificación hasta la localización de la planta de valorización. Se considera el transporte de **13 toneladas a camión completo durante 280 kilómetros**.

Flow	Category	Amount	Unit	Provider		
F <sub>2</sub> transport in t*km	Transport services/Other transport	7,5*280	kg*km	P Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER		
Outputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided product
F <sub>2</sub> NEUMÁTICO DE OCASIÓN		1.00000	Item(s)		none	

Figura 285. Entrada de datos de factores de impacto ambiental EIT<sub>3i</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00038 puntos**.

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P NEUMÁTICO DE OCASIÓN	0.00038	points
> 100.00%	P Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	0.00038	points

Figura 286. Valores obtenidos de impacto ambiental EIT<sub>3i</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

Este impacto ambiental se contempla para las alternativas de componentes, por tanto, se reparte su valor proporcionalmente entre todos ellos en base al peso de cada uno de ellos sobre el producto final:

**Acero (20%): EIT<sub>3i1</sub> = 0'000076 puntos**

**Fibra (12%): EIT<sub>3i2</sub> = 0'0000456 puntos**

**Caucho (68%):  $EIT_{3i3} = 0'0002584$  puntos**

**EIP<sub>2i</sub>** impacto ambiental de valorización del producto *i*. Se contabilizan un total de 1'4 GW de consumo anual para la valorización de 20.000 t de neumáticos. Con ellos, se obtiene un valor de 70 W/t, dando un total de 0'525 W/ud.

Inputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Provider		
Electricity	Energy carriers and technologi...	0.52500	Wh	Electricity grid mix, consumption mix, at consumer, AC, 230V - ES		
Outputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	
NEUMÁTICO DE OCASIÓN		1.00000	Item(s)		none	

**Figura 287.** Entrada de datos de factores de impacto ambiental EIP<sub>2i</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido, para la valorización de un neumático es de **0'00000652 puntos**.

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	NEUMÁTICO DE OCASIÓN	6.51960E-6	points
> 100.00%	Electricity grid mix, consumption mix, at consumer, AC, 230V - ES	6.51960E-6	points

**Figura 288** Valores obtenidos de impacto ambiental EIP<sub>2i</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

Este impacto ambiental se contempla para las alternativas de componentes, por tanto, se reparte su valor proporcionalmente entre los componentes en base al peso de cada uno de ellos sobre el producto final:

**Acero (20%):  $EIP_{2i1} = 0'000001304$  puntos**

**Fibra (12%):  $EIP_{2i2} = 0'00000078$  puntos**

**Caucho (68%):  $EIP_{2i3} = 0'0000044$  puntos**

**EIT<sub>4i1</sub>** impacto ambiental del transporte del componente *l* (*acero*) del producto *i* desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje. En esta alternativa se contempla el **transporte de 24 toneladas a camión lleno durante 500 kilómetros.**

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

Inputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Provider
transport in t*km	Transport services/Other transport	1.5*500	kg*km	Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight, 27 t max payload - RER

Outputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided product
NEUMÁTICO DE OCASIÓN		1.00000	Item(s)		none	

Figura 289. Entrada de datos de factores de impacto ambiental EIT<sub>4i1</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido **de 1'5 kg de acero**, es de **0'00009652 puntos**.

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	NEUMÁTICO DE OCASIÓN	9.65259E-5	points
> 100.00%	Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight, 27 t max payload - RER	9.65259E-5	points

Figura 290. Valores obtenidos de impacto ambiental EIT<sub>4i1</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

EIT<sub>4i3</sub>, impacto ambiental del transporte del componente 3 (*caucho*) del producto *i* desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje. En esta alternativa se contempla el **transporte a camión lleno durante 1000 kilómetros**.

Inputs				
Flow	Category	Amount	Unit	Provider
transport in t*km	Transport services/Other transp...	5.1*1000	kg*km	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER

Outputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided product
NEUMÁTICO DE OCASIÓN		1.00000	Item(s)		none	

Figura 291. Entrada de datos de factores de impacto ambiental EIT<sub>4i3</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido para **5'1 kg de caucho** es de **0'00092 puntos**.

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	NEUMÁTICO DE OCASIÓN	0.00092	points
> 100.00%	Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	0.00092	points

Figura 292. Valores obtenidos de impacto ambiental EIT<sub>4i3</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperar valor:

Las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor cuentan con los mismos parámetros comunes que la anterior categoría de alternativas, aquellas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, respecto a los siguientes parámetros:

- $EIT_{3ij}$ , impacto ambiental del transporte del producto  $i$  desde la planta de recogida y clasificación hasta la localización de la planta de valorización.
- $EIP_{2i}$  impacto ambiental de valorización del producto  $i$ .

A parte de estos parámetros, otro parámetro común para este tipo de alternativas es el impacto ambiental del transporte del componente  $j$  del producto  $i$  desde la planta de valorización hasta la planta de tratamiento, incineración en este caso. A continuación, se muestra el cálculo de dicho parámetro para los dos componentes que pueden ser incinerados:

$EIT_{5i2}$  impacto ambiental del transporte del componente 2 (*fibra*) del producto  $i$  desde la planta de valorización hasta la planta de incineración. En esta alternativa se contempla el transporte de **13 toneladas a camión completo a lo largo de 400 kilómetros.**

Inputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Provider		
F <sub>2</sub> transport in t*km	Transport services/Other transp...	0.9*400	kg*km	P Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER		
Outputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided produ...
F <sub>2</sub> NEUMÁTICO DE OCASIÓN		1.00000	Item(s)		none	

Figura 293. Entrada de datos de factores de impacto ambiental  $EIT_{5i2}$  en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido, de **0'9 kg de fibra** es de **0'00006475 puntos.**

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P NEUMÁTICO DE OCASIÓN	6.47483E-5	points
> 100.00%	P Lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 22 t total weight, 17,3t max payload - RER	6.47483E-5	points

Figura 294. Valores obtenidos de impacto ambiental  $EIT_{5i2}$  en OpenLCA (Elaboración propia)

$EIT_{5i3}$  impacto ambiental del transporte del componente 3 (*caucho*) del producto  $i$  desde la planta de valorización hasta la planta de incineración. En esta alternativa se contempla el transporte de **24 toneladas a camión completo a lo largo de 400 kilómetros.**

Inputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Provider		
F <sub>2</sub> transport in t*km	Transport services/Other transport	5.1*400	kg*km	P Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight, 27 t max payload - RER		
Outputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided product
F <sub>2</sub> NEUMÁTICO DE OCASIÓN		1.00000	Item(s)		none	

**Figura 295.** Entrada de datos de factores de impacto ambiental EIT<sub>513</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido, de **5'10 kg de caucho** es de **0'00026 puntos**.

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P NEUMÁTICO DE OCASIÓN	0.00026	points
> 100.00%	P Articulated lorry transport, Euro 0, 1, 2, 3, 4 mix, 40 t total weight, 27 t max payload - RER	0.00026	points

**Figura 296.** Valores obtenidos de impacto ambiental EIT<sub>513</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

Parámetros ambientales específicos a cada alternativa de tratamiento:

a) **Reacondicionamiento:**

**EIP<sub>1i</sub>** impacto ambiental de reacondicionamiento del producto *i*. Las operaciones de recauchutado consumen aproximadamente 25 minutos de trabajo manual, ayudado de herramientas eléctricas, con lo que el impacto ambiental se centra en el consumo de energía eléctrica. El consumo energético medio de este tipo de operaciones está cifrado en 1'8 KWh/día, lo que equivale a 225 Wh/h para una jornada de 8 horas, por tanto, el consumo energético de la operación de desensamblaje se cuantifica en **93'75 Wh/ud.**

Inputs					
Flow	Category	Amount	Unit	Provider	
Electricity	Energy carriers and technologies/Electricity	93.75000	Wh	Electricity grid mix, consumption mix, at consumer, AC, 230V - ES	
Outputs					
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty
recauchutado		7.50000	kg		none

**Figura 297.** Entrada de datos de factores de impacto ambiental EIP<sub>1i</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00116puntos**.

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P recauchutado	0.00116	points
> 100.00%	P Electricity grid mix, consumption mix, at consumer, AC, 230V - ES	0.00116	points

**Figura 298.** Valores obtenidos de impacto ambiental EIP<sub>1i</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

b) **Reciclaje:**

**EIR<sub>1i</sub>** impacto ambiental de reciclaje del componente *I* (*acero*) del producto *i*. El impacto ambiental del reciclaje vendrá dado fundamentalmente por el consumo



eléctrico de las operaciones mecánicas realizadas sobre el componente para su reciclaje. En este sentido, si el consumo energético medio de este tipo de operaciones está cifrado en 1 KWh/día, lo que equivale a 125 Wh/h contando que se trabajan 8 horas al día, el consumo eléctrico de las operaciones de reciclaje de la estructura, considerando que se tardan 5 minutos aproximadamente, se cifra en **10'417 Wh/ud.**

Inputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Provider		
Electricity	Energy carriers and technol...	10.41700	Wh	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES		
Outputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided pro...
Sillón Relax		1.00000	Item(s)		none	

Figura 299. Entrada de datos de factores de impacto ambiental EIR<sub>i1</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00012 puntos.**

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	Sillón Relax	0.00012	points
> 100.00%	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES	0.00012	points

Figura 300. Valores obtenidos de impacto ambiental EIR<sub>i1</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

**EIR<sub>i3</sub>** impacto ambiental de reciclaje del componente 3 (*caucho*) del producto *i*. El impacto ambiental del reciclaje vendrá dado fundamentalmente por el consumo eléctrico de las operaciones mecánicas realizadas sobre el componente para su reciclaje. En este sentido, si el consumo energético medio de este tipo de operaciones está cifrado en 1 KWh/día, lo que equivale a 125 Wh/h contando que se trabajan 8 horas al día, el consumo eléctrico de las operaciones de reciclaje de la estructura, considerando que se tardan 5 minutos aproximadamente, se cifra en **10'417 Wh/ud.**

Inputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Provider		
Electricity	Energy carriers and technol...	10.41700	Wh	Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES		
Outputs						
Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Reven...	Uncertainty	Avoided pro...
Sillón Relax		1.00000	Item(s)		none	

Figura 301. Entrada de datos de factores de impacto ambiental EIR<sub>i3</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'00012 puntos**.

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P Sillón Relax	0.00012	points
> 100.00%	P Electricity grid mix 1kV-60kV, consumption mix, at consumer, AC, 1kV - 60kV - ES	0.00012	points

Figura 302. Valores obtenidos de impacto ambiental EIR<sub>i3</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

c) **Incineración:**

EII<sub>i2</sub> impacto ambiental de incineración del componente 2 (*fibra*) del producto

i. Incineración de 0'9 kg de fibra de neumático

Flow	Category	Amount	Unit	Provider
waste incineration of textile fraction ...	End-of-life treatment/Energy recycling	0.90000	kg	P Waste incineration of textile fraction in municipal solid waste (MSW), at plant, average European waste-to-energy plant, without

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod...	Provider	Data quality e...	Description
NEUMÁTICO DE OCASIÓN		1.00000	Item(s)		none				

Figura 303. Entrada de datos de factores de impacto ambiental EII<sub>i2</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **-0'00057 puntos**.

Contribution	Process	Amount	Unit
100.00%	P NEUMÁTICO DE OCASIÓN	-0.00057	points
> 100.00%	P Waste incineration of textile fraction in municipal solid waste (MSW), at plant, average European waste-to-energy plant, without collection, transport and pre-treatment - EU-27	-0.00057	points

Figura 304. Valores obtenidos de impacto ambiental EIR<sub>i3</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

En este caso, el programa arroja una cifra negativa porque considera beneficioso incinerar una fibra respecto que sea desechada o vertida. Además, también es considerado beneficioso el hecho de que, para crear energía, se use fibra desechada proveniente de un producto en fin de uso en vez de otra materia prima como el carbón, el gas o la electricidad, por ejemplo.

EII<sub>i3</sub> impacto ambiental de incineración del componente 3 (*caucho*) del producto i. Incineración de 5'1 kg de caucho de neumático.

Flow	Category	Amount	Unit	Provider
waste incineration of plastics (unspecified)...	End-of-life treatment/Energy r...	5.10000	kg	P Waste incineration of plastics (unspecified) fraction in municipal solid waste (MSW), at plant, average European waste-to-energy

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod...	Provider	Data quality e...	Description
NEUMÁTICO DE OCASIÓN		1.00000	Item(s)		none				

Figura 305. Entrada de datos de factores de impacto ambiental EII<sub>i3</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

El impacto ambiental obtenido es de **0'06547 puntos**.

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

Contribution	Process	Amount	Unit
✓ 100.00%	P NEUMÁTICO DE OCASIÓN	0.06547	points
> 100.00%	P Waste incineration of plastics (unspecified) fraction in municipal solid waste (MSW), at plant, average European waste-to-energy plant,...	0.06547	points

Figura 306. Valores obtenidos de impacto ambiental EII<sub>i3</sub> en OpenLCA (Elaboración propia)

A continuación, se muestra una tabla resumen (Tabla 62) donde se indican los valores referidos a los parámetros ambientales aplicables al ejemplo de aplicación. Los parámetros son coloreados según el ámbito de aplicación (verde – parámetros comunes según finalidad, marrón – parámetros comunes para todas las alternativas y azul – parámetros específicos para cada alternativa):

PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
<b>EIT<sub>1i</sub></b>	8'09354e <sup>-5</sup> pt/ud	impacto ambiental del transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa
PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>EIT<sub>2Ai</sub></b>	0'00031 pt/ud	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de ocasión
<b>EIT<sub>2Bi</sub></b>	0'01578 pt/ud	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de gomilla (mercado secundario)
<b>EIT<sub>2Ci</sub></b>	0'00162 pt/ud	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de carcasa (recauchutado)
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>EIT<sub>3i1</sub></b>	0'000076 pt/ud	impacto ambiental del transporte del componente 1( <i>acero</i> ) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)
<b>EIT<sub>3i3</sub></b>	0'0002584 pt/ud	impacto ambiental del transporte del componente 3( <i>caucho</i> ) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)
<b>EIP<sub>2i,1</sub></b>	0'000001304 pt/ud	impacto ambiental de la valorización del componente 1 ( <i>acero</i> ) del producto i

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

<b>EIP<sub>2i,3</sub></b>	0'0000044 pt/ud	impacto ambiental de la valorización del componente 3 ( <i>caucho</i> ) del producto <i>i</i>
<b>EIT<sub>4i,1</sub></b>	0'00009652 pt/ud	impacto ambiental del transporte del componente 1 ( <i>acero</i> ) del producto <i>i</i> desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje
<b>EIT<sub>4i,3</sub></b>	0'00092 pt/ud	impacto ambiental del transporte del componente 3 ( <i>caucho</i> ) del producto <i>i</i> desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje
<b>Costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto:</b>		
<b>EIT<sub>3i2</sub></b>	0'0000456 pt/ud	impacto ambiental del transporte del componente 2 ( <i>fibra</i> ) del producto <i>i</i> desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)
<b>EIT<sub>3i33</sub></b>	0'0002584 pt/ud	impacto ambiental del transporte del componente 3 ( <i>caucho</i> ) del producto <i>i</i> desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)
<b>EIP<sub>2i,2</sub></b>	0'00000078 pt/ud	impacto ambiental de la valorización del componente 2 ( <i>fibra</i> ) del producto <i>i</i>
<b>EIP<sub>2i,3</sub></b>	0'0000044 pt/ud	impacto ambiental de la valorización del componente 3 ( <i>caucho</i> ) del producto <i>i</i>
<b>EIT<sub>5i,2</sub></b>	0'00006475 pt/ud	impacto ambiental del transporte del componente 2 ( <i>fibra</i> ) del producto <i>i</i> la planta de valorización hasta el centro eliminación por incineración
<b>EIT<sub>5i,3</sub></b>	0'00026 pt/ud	impacto ambiental del transporte del componente 3 ( <i>caucho</i> ) del producto <i>i</i> la planta de valorización hasta el centro eliminación por incineración
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
<b>EIP<sub>1i</sub></b>	0'00116 pt/ud	impacto ambiental de reacondicionamiento del producto <i>i</i>
<b>EIR<sub>i,1</sub></b>	0'00012 pt/ud	impacto ambiental de reciclaje del componente 1 ( <i>acero</i> ) del producto <i>i</i>
<b>EIR<sub>i,3</sub></b>	0'00012 pt/ud	impacto ambiental de reciclaje del componente 3 ( <i>caucho</i> ) del producto <i>i</i>

**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.**

<b>EII<sub>i,2</sub></b>	-0'00057 pt/ud	impacto ambiental de incineración del componente 2 ( <i>fibra</i> ) del producto <i>i</i>
<b>EII<sub>i,3</sub></b>	0'06547 pt/ud	impacto ambiental de incineración del componente 3 ( <i>caucho</i> ) del producto <i>i</i>

**Tabla 62.** Valores ambientales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

**Valores de Impacto Ambiental para cada Alternativa.**

El valor de impacto ambiental para cada alternativa de disposición se obtiene tras la agregación de los valores de los distintos parámetros referentes a cada una de ellas, tal y como se ha expuesto en el apartado 9.3.2. Para facilitar el entendimiento de los valores de impacto ambiental de cada alternativa, se expone en la figura siguiente (Figura 242) el desglose de aspectos que componen el impacto ambiental de las alternativas de LI:



**Figura 307.** Estructura de aspectos que componen el impacto ambiental de las alternativas de LI (Elaboración propia).

A continuación, se mostrará los parámetros ambientales que hacen referencia a cada alternativa y sus valores correspondientes, obteniendo el valor de impacto ambiental de cada alternativa. Asimismo, se acompaña en cada alternativa una miniatura de la imagen anterior, destacando los parámetros aplicables a la alternativa en cuestión:

1. Alternativas de reintroducción en el mercado:

○ Reutilización como neumático tipo Ocasión.

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	ASPECTOS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	ASPECTOS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD	ASPECTOS AMBIENTALES ESPECÍFICOS
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	Reutilización/reventa	Transporte desde el usuario hasta el centro de recolección	Transporte hasta el punto de tratamiento y hasta el cliente	-----
	Reparación			
	Reacondicionamiento			
	Remanufacturaación			

Dado que en esta alternativa de tratamiento no se interviene sobre el producto, el impacto ambiental de la alternativa de ocasión vendrá dado por el impacto ambiental correspondiente al

transporte desde el cliente hasta la planta de clasificación ( $EIT_{1i} = 0'0000809354 \text{ pt/ud}$ ) y desde la planta de clasificación hasta el nuevo cliente del neumático de ocasión ( $EIT_{2Ai} = 0'00031 \text{ pt/ud}$ ).

$$E_{LOCAi} = EIT_{1i} + EIT_{2Ai} = 0'0004 \text{ pt/ud.}$$

○ Reutilización como neumático tipo Gomilla.

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	ASPECTOS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	ASPECTOS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD	ASPECTOS AMBIENTALES ESPECÍFICOS
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	Reutilización/reventa	Transporte desde el usuario hasta el centro de recolección	Transporte hasta el punto de tratamiento y hasta el cliente	-----
	Reparación			
	Reacondicionamiento			
	Remanufacturaación			

El impacto ambiental correspondiente a la alternativa de gomilla también está compuesto principalmente por el transporte desde el cliente hasta la planta de clasificación ( $EIT_{1i} = 0'0000809354 \text{ pt/ud}$ )

y desde la planta de clasificación hasta el nuevo cliente ( $EIT_{2Bi} = 0'01578 \text{ pt/ud}$ ), siendo este último sensiblemente diferente al caso anterior por la peculiaridad del mercado al que se dirige.

$$E_{GOMi} = EIT_{1i} + EIT_{2Bi} = 0'0159 \text{ pt/ud}$$

○ **Reacondicionamiento del producto tipo Carcasa - Recauchutado.**



El cálculo del impacto ambiental correspondiente a la alternativa de carcasa-recauchutado, se obtiene mediante la agregación del impacto ambiental del transporte correspondiente entre el cliente y la planta

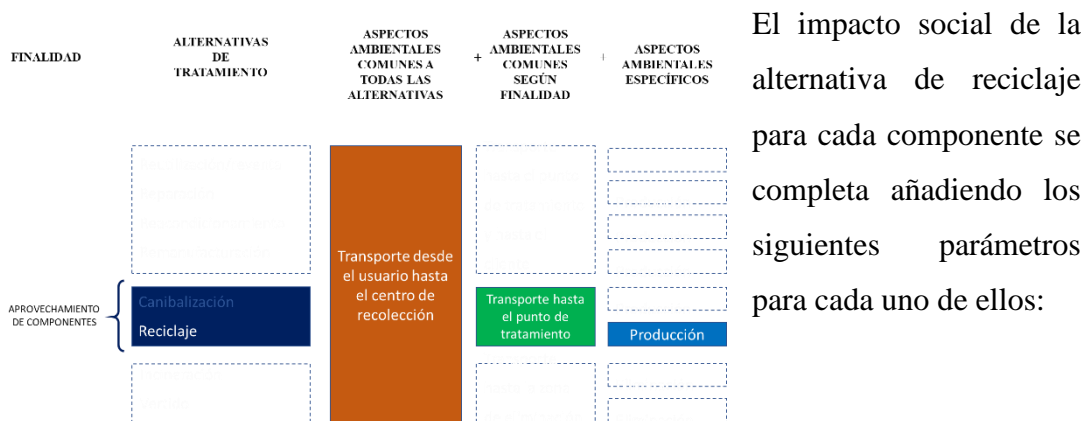
de clasificación ( $EIT_{1i} = 0'0000809354 \text{ pt/ud}$ ), más el impacto del transporte entre la planta de clasificación y la planta de recauchutado y entre la planta de recauchutado y el nuevo cliente ( $EIT_{2Ci} = 0'00162 \text{ pt/ud}$ ) y el valor del impacto ambiental del proceso de recauchutado ( $EIP_{1i} = 0'00116 \text{ pt/ud}$ ).

$$\underline{EI_{REFi} = EIT_{1i} + EIT_{2Ci} + EIP_{1i} = 0'0029 \text{ pt/ud}}$$

**2. Alternativas de aprovechamiento de componentes.**

El cálculo del impacto ambiental en el caso de las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, debe contemplar la existencia de ciertos parámetros ambientales que son comunes a todas las alternativas posibles, como son el impacto ambiental del transporte correspondiente entre el cliente y la planta de clasificación ( $EIT_{1i}$ ), el impacto ambiental del transporte correspondiente entre la planta de clasificación y la planta de valorización ( $EIT_{3i}$ ) más el impacto ambiental correspondiente a la valoración del producto  $i$  ( $EIP_{2i}$ ). A partir de este punto, se consideran los parámetros ambientales correspondientes a la única alternativa considerada:

○ **Reciclaje.**



- **Acero.** El impacto ambiental del acero, dentro de la única alternativa que se contempla (reciclaje), se obtiene tras añadir a los parámetros ambientales comunes, en base a la proporción del acero sobre el producto (20 %), más el impacto correspondiente al transporte entre la planta de valorización y la planta de reciclaje ( $EIT_{4i1}$ ) y el impacto correspondiente al proceso de reciclaje del acero ( $EIR_{i1}$ ).

$$\underline{EI_{RECH1} = (EIT_{1i} + EIT_{3i} + EIP_{2i}) * 0'2 + EIT_{4i1} + EIR_{i1} = 0'0003 \text{ pt/ud}}$$

- **Caucho.** El impacto ambiental del caucho, dentro de la única alternativa que se contempla (reciclaje), se obtiene tras añadir a los parámetros ambientales comunes, en base a la proporción del caucho sobre el producto (68 %), más el impacto correspondiente al transporte entre la planta de valorización y la planta de reciclaje ( $EIT_{4i3}$ ) y el impacto correspondiente al proceso de reciclaje del caucho ( $EIR_{i3}$ ).

$$\underline{EI_{RECH3} = (EIT_{1i} + EIT_{3i} + EIP_{2i}) * 0'68 + EIT_{4i3} + EIR_{i3} = 0'0014 \text{ pt/ud}}$$

**3. Alternativas de eliminación sin recuperación de valor.**

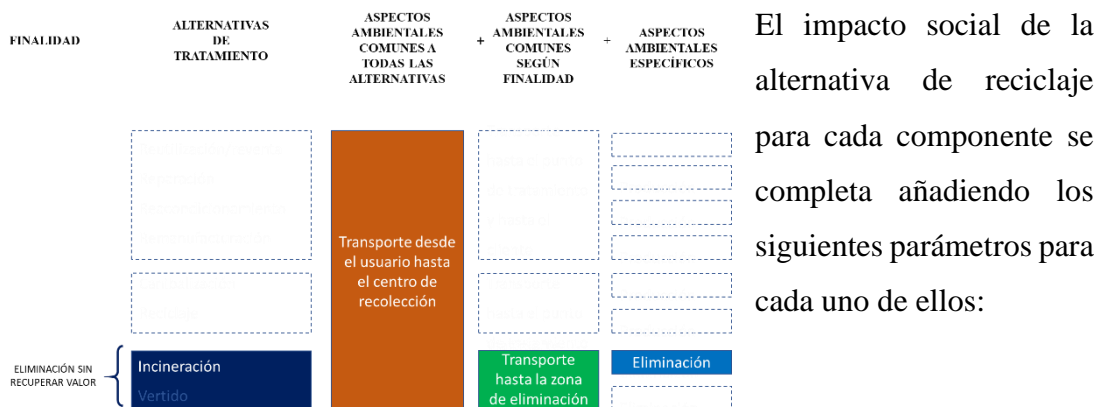
El cálculo del impacto ambiental en el caso de las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor, debe contemplar la existencia de los parámetros ambientales comunes a todas las alternativas posibles, como son el impacto ambiental del transporte correspondiente entre el cliente y la planta de clasificación ( $EIT_{1i}$ ), el impacto ambiental del transporte correspondiente entre la planta de clasificación y la planta de valorización ( $EIT_{3i}$ ) más el



impacto ambiental correspondiente a la valoración del producto  $i$  ( $EIP_{2i}$ ), **igual que sucedía en las alternativas de aprovechamiento de componentes.**

A partir de este punto, se consideran los parámetros ambientales correspondientes a la única alternativa considerada:

○ **Incineración.**



- **Fibra.** El impacto ambiental de la fibra, dentro de la única alternativa que se contempla (incineración), se obtiene tras añadir a los parámetros ambientales comunes, en base a la proporción del acero sobre el producto (12 %), el impacto correspondiente al transporte entre la planta de valorización y la planta de incineración ( $EIT_{5i2}$ ) y el impacto correspondiente a la incineración de la fibra ( $EII_{i2}$ ).

$$\underline{EI_{BURI2} = (EIT_{1i} + EIT_{3i} + EIP_{2i}) * 0'12 + EIT_{5i2} + EII_{i2} = -0'0004 \text{ pt/ud}}$$

- **Caucho.** El impacto ambiental del caucho, dentro de la única alternativa que se contempla (incineración), se obtiene tras añadir a los parámetros ambientales comunes, en base a la proporción del acero sobre el producto (68 %), más el impacto correspondiente al transporte entre la planta de valorización y la planta de incineración ( $EIT_{5i3}$ ) y el impacto correspondiente a la incineración de la fibra ( $EII_{i3}$ ).

$$\underline{EI_{BURI3} = (EIT_{1i} + EIT_{3i} + EIP_{2i}) * 0'68 + EIT_{5i3} + EII_{i3} = 0'0660 \text{ pt/ud}}$$

A continuación, se muestra una tabla resumen (Tabla 31) con los valores de impacto ambiental de cada una de las alternativas de disposición:

<b>Valores de impacto ambiental correspondiente a cada alternativa:</b>		
<b>EI<sub>OCAi</sub></b>	0'0004 pt/ud	impacto ambiental debido a la reutilización del producto i como neumático tipo ocasión
<b>EI<sub>GOMi</sub></b>	0'0159 pt/ud	impacto ambiental debido a la reutilización del producto i como neumático tipo gomilla
<b>EI<sub>REFi</sub></b>	0'0029 pt/ud	impacto ambiental debido al reacondicionamiento del producto i
<b>EI<sub>RECI1</sub></b>	0'0003 pt/ud	impacto ambiental debido al reciclaje del componente 1 (acero) del producto i
<b>EI<sub>RECI3</sub></b>	0'0014 pt/ud	impacto ambiental debido al reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i
<b>EI<sub>BURI2</sub></b>	-0'0004 pt/ud	impacto ambiental debido a la incineración del componente 2 (fibra) del producto i
<b>EI<sub>BURI3</sub></b>	0'0660 pt/ud	impacto ambiental debido a la incineración del componente 3 (caucho) del producto i

**Tabla 63.** Valores de impacto ambiental correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia).

### 15.2.3.3. *Valores sociales*

Los parámetros sociales están compuestos por las horas de MO necesarias para cada alternativa, categorizadas en base al factor regional de la zona geográfica donde se llevan a cabo las operaciones necesarias para cada una de las distintas alternativas.

Para poder calcular los valores de impacto social de cada alternativa, se van a calcular primero los valores de tiempo de MO referente a cada alternativa y luego el factor regional de cada zona de intervención.

### **Valores de Mano de Obra.**

El cálculo de los valores de MO correspondiente a cada alternativa corresponde al sumatorio de tiempo de las operaciones necesarias para ejecutar cada alternativa. Siguiendo la misma estructura que los valores económicos y ambientales, se calcula primero los que son comunes a todas las alternativas, luego los que son comunes a las alternativas según su finalidad y, por último, aquellos que son específicos de cada alternativa, obteniendo finalmente el valor de cada alternativa:

- **Horas de MO comunes a todas las alternativas.**

Todos los productos son recogidos por la planta de recogida y clasificación, para categorizarlos, almacenarlos y aprovechar al máximo el valor que les quede, por ello, la cuantía de las horas de trabajo por unidad realizadas en dicha planta, se consideran comunes a todas las alternativas y viene designado por el parámetro  $W_{1i}$ .

En este sentido, la **recogida** es realizada por 4 operarios a razón de 40 h/semana y que tratan 4800 t/año. Considerando 48 semanas/año, dan un total de 1.920 horas/operario, es decir 7.680 h/año. Como resultado, se obtiene un valor medio de 1'6 h/t, que pasado a unidades quedaría **0'012 h/ud.**

Además, las tareas de **categorización, almacén y venta** son realizadas por 13 personas capaces de gestionar un total de 25.000 uds/mes. Según los cálculos aplicados anteriormente, dan un total de 24.960 h/año para 300.000 unidades, dando un total de **0'083 h/ud.**

Teniendo en cuenta el tiempo destinado por unidad, por un lado, de las tareas de recogida y, por otro lado, de las tareas de categorización, almacén y venta, se estima que la generación de tiempo en total es de  **$W_{1i} = 0'095$  h/ud.**

- **Horas de MO comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado.**

Las horas de MO comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado vienen dadas por el transporte entre la planta de recogida y clasificación y el nuevo cliente, designado por el parámetro  $W_{2i}$ . Según cada alternativa, el tipo de cliente es distinto, por lo que el transporte es diferente, según cada alterativa de disposición:

- $W_{2Ai}$  el transporte correspondiente al neumático tipo ocasión
- $W_{2Bi}$  el transporte correspondiente al neumático tipo gomilla
- $W_{2Ci}$  el transporte correspondiente al neumático tipo carcasa

Las características de los transportes correspondientes vienen recogidas en la siguiente tabla (Tabla 64). En ella, se muestra correlativamente en cada columna el código del transporte, la planta de salida, la planta de destino, los kilómetros

recorridos, el tiempo destinado en el transporte, la cantidad transportada, la media de horas por tonelada, la medida de kilogramos por unidad y, por último, el valor de horas por cada unidad.

Transporte	Planta salida	Planta Destino	Kilómetros	Tiempo destinado	Cantidad transportada	h/t	Kg/Ud.	h/Ud.
<b>W<sub>2Ai</sub></b>	Recogida y clasificación	Cliente ocasión	100	1'25 horas	2 toneladas	0'62500	7'5	<b>0'00469</b>
<b>W<sub>2Bi</sub></b>	Recogida y clasificación	Cliente gomilla (Camión)	220	2'65 horas	13 toneladas	0'20385	7'5	<b>0'00153</b>
	Recogida y clasificación	Cliente gomilla (Barco)	8000	335 horas	100.000 toneladas	0'00335	7'5	<b>0'00003</b>
<b>W<sub>2Ci</sub></b>	Recogida y clasificación	Planta Recauchutadora	200	2'5 horas	13 toneladas	0'19231	7'5	<b>0'00144</b>
	Planta Recauchutadora	Planta Cliente Carcasa	1000	12'5 horas	13 toneladas	0'96154	7'5	<b>0'00721</b>

**Tabla 64.** Datos y cálculos sobre el transporte entre la planta de recogida y clasificación y el nuevo cliente utilizados en el ejemplo de aplicación (Elaboración propia)

- **Horas de MO comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes.**

Todas las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes tienen en común la **etapa en la que el producto es transportado desde la planta de recogida y clasificación hasta la planta de valorización (W<sub>3i</sub>)**, así como la **etapa de valorización del producto para separar los componentes (W<sub>vij</sub>)** y el transporte entre la planta de valorización y la planta de reciclaje (W<sub>4ij</sub>).

Las características del transporte desde la planta de recogida y clasificación hasta la planta de valorización vienen recogidas en la siguiente tabla (Tabla 65). En ella, se muestra la información con las mismas características que en el apartado anterior.

Transporte	Planta salida	Planta Destino	Kilómetros	Tiempo destinado	Cantidad transportada	h/t	Kg/Ud.	h/Ud.
<b>W<sub>3i</sub></b>	Recogida y clasificación	Valorización	280	3'90 horas	13 toneladas	0'30000	7'5	<b>0'00225</b>

**Tabla 65.** Datos y cálculos sobre el transporte entre la planta de recogida y clasificación y la planta de valorización utilizados en el ejemplo de aplicación (Elaboración propia)

En el tiempo generado por este tipo de transporte es calculado por unidad de producto, no obstante, sabiendo que las alternativas son cifradas por componentes, el valor de dicho transporte se reparte entre los componentes según la proporción de los componentes sobre el producto final, quedando de la siguiente manera:

$$W_{3i1} = (0'00225*0'2) = 0'00045 \text{ h/ud}$$

$$W_{3i2} = (0'00225*0'12) = 0'00027 \text{ h/ud}$$

$$W_{3i3} = (0'00225*0'68) = 0'00153 \text{ h/ud}$$

La planta de valorización emplea a un total de 21 personas entre las labores de producción y venta, gestionando un total de 20.000 t/año, dando un total de **0'015 h/ud**. En este caso, puesto que en la planta de valorización se separan los componentes del neumático, este tiempo es distribuido entre componentes, obteniendo, en base al porcentaje de cada componente del neumático, la proporción de tiempo que le corresponde a cada uno de ellos, igual que el apartado anterior. De esta forma, se considera que corresponde:

$$W_{vi1} = (0'015*0'2) = 0'003 \text{ h/ud}$$

$$W_{vi2} = (0'015*0'12) = 0'002 \text{ h/ud}$$

$$W_{vi3} = (0'015*0'68) = 0'010 \text{ h/ud}$$

A parte de estos dos parámetros, las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes tienen en común el parámetro social del transporte entre la planta de valorización y la planta de tratamiento ( $W_{4ij}$ ). Las características de dicho transporte dependen de cada componente y vienen recogidas en la siguiente tabla (Tabla 66). En ella, se muestra la información con las mismas características que en los apartados anteriores.

Transporte	Planta salida	Planta Destino	Kilómetros	Tiempo destinado	Cantidad transportada	h/t	Kg/Ud.	h/Ud.
<b>W<sub>4i1</sub></b>	Valorización	Reciclaje Acero	500	6'25 horas	24 toneladas	0'26042	1'5	<b>0'00039</b>
<b>W<sub>4i3</sub></b>	Valorización	Reciclaje Caucho	1000	10 horas	13 toneladas	0'76923	5'1	<b>0'00392</b>

**Tabla 66.** Datos y cálculos sobre el transporte entre la planta de valorización y la planta de reciclaje utilizados en el ejemplo de aplicación (Elaboración propia)

- **Horas de MO comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto.**

Todas las alternativas con la finalidad de eliminación del producto (incineración) comparten las siguientes etapas con las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes (reciclaje):

- Etapa en la que el producto es transportado desde la planta de recogida y clasificación hasta la planta de valorización ( $W_{3i}$ )
- Etapa de valorización del producto para separar los componentes ( $W_{vij}$ )

A parte de estos dos parámetros, las alternativas con la finalidad de eliminación del producto tienen en común el parámetro social del transporte entre la planta de valorización y la planta de tratamiento ( $W_{5ij}$ ). Las características de dicho transporte dependen de cada componente y vienen recogidas en la siguiente tabla (Tabla 67). En ella, se muestra la información con las mismas características que en los apartados anteriores.

Transporte	Planta salida	Planta Destino	Kilómetros	Tiempo destinado	Cantidad transportada	h/t	Kg/Ud.	h/Ud.
$W_{5i2}$	Valorización	Incineradora Fibra	400	5 horas	13 toneladas	0'38462	0'9	<b>0'00035</b>
$W_{5i3}$	Valorización	Incineradora Caucho	400	5 horas	24 toneladas	0'20833	5'1	<b>0'00106</b>

**Tabla 67.** Datos y cálculos sobre el transporte entre la planta de valorización y la planta de incineración utilizados en el ejemplo de aplicación (Elaboración propia)

- **Horas de MO específicas a la alternativa de reacondicionamiento.**

Las tareas propias de reacondicionamiento de neumáticos se prolongan durante una media de 25 minutos para cada neumático en la planta de recauchutado, es decir  $W_{refi} = 0'4167$  h/ud.

- **Horas de MO específicas a la alternativa de reciclaje de componentes.**

El tiempo específico correspondiente al reciclaje de componentes, se centra en el tiempo destinado a intervenir sobre cada componente del producto y viene designada por el parámetro  $W_{recij}$ .

**Horas de MO destinadas al reciclaje del acero.**

La cuantificación del tiempo destinado al reciclaje del acero correspondiente a un neumático (1'5 kg) se cifra en 5 minutos aproximadamente ( $W_{reci1} = 0'0833$  h/ud.)

**Horas de MO destinadas al reciclaje del caucho.**

La cuantificación del tiempo destinado al reciclaje del caucho correspondiente a un neumático (5'1 kg) se cifra en 5 minutos aproximadamente (**Wrec<sub>i3</sub> = 0'0833 h/ud**). En este caso, se considera el mismo tiempo que en el apartado anterior, a pesar de ser mayor volumen, debido a que el reciclaje del caucho se elabora en mayores cantidades que el acero, es decir, en el mismo tiempo se reciclan mayores cantidades.

- **Horas de MO específicas a la alternativa de incineración de componentes.**

El tiempo destinado a la incineración de los componentes de un neumático resulta muy difícil de cuantificar porque en pequeñas cantidades de tiempo son capaces de tratar gran cantidad de materiales. Asimismo, también en el caso de la incineración, el caucho se trata con mayores volúmenes que la fibra, por tanto, se considera un tiempo aproximado para ambos componentes de 1 minuto/ud (**Wbur<sub>i2</sub> = Wbur<sub>i3</sub> = 0'0167 h/ud**).

**Valores de factor regional para cada Alternativa.**

El valor del impacto social correspondiente a cada alternativa se obtiene al multiplicar las horas de MO necesarias para las operaciones de cada alternativa por un factor regional de la zona donde se lleva a cabo el trabajo. En este sentido, se ha marcado como factor regional la tasa de desempleo de la provincia donde se ejecuta las operaciones, en base a la tasa de desempleo nacional.

Según las provincias donde se realizan las distintas operaciones y los valores de la tasa de desempleo, correspondientes al segundo trimestre de 2019, el factor regional de cada zona queda recogido en la tabla siguiente:

	Tasa de desempleo 2T – 2019	Factor regional ( $\mu_i$ )
Valor Nacional	14'02	1'00
Valencia (Provincia)	14'00	0'99
Murcia (Provincia)	13'36	0'95
Barcelona (Provincia)	10'93	0'78
Madrid (Provincia)	10'54	0'75
Alicante (Provincia)	14'71	1'05

**Tabla 68.** Tasas de desempleo y factor regional para cada provincia donde se realizan operaciones (Elaboración propia).

**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.**

Todas las operaciones que realizan en la planta de recogida y clasificación se ubican en la provincia de Valencia, igual que la venta del producto tipo ocasión ( $\mu = 0'99$ ). En cambio, la venta del producto gomilla y recauchutado, se adopta el valor medio nacional ( $\mu = 1$ ). La planta de valorización se ubica en la provincia de Murcia ( $\mu = 0'95$ ) y la planta de recauchutado en la provincia de Alicante ( $\mu = 1'05$ ). La incineración, tanto de la fibra como del caucho, se realiza en la provincia de Madrid ( $\mu = 0'75$ ) y el reciclaje del acero se realiza en la provincia de Barcelona ( $\mu = 0'78$ ). En cambio, el reciclaje del caucho se puede realizar en gran cantidad de destinos, tanto nacionales como internacionales (40% extranjero y 60 % en España), por lo que se aplica la media nacional como factor regional ( $\mu = 1$ ).

A continuación, se muestra una tabla resumen (Tabla 69) donde se indican los valores referidos a los parámetros sociales aplicables al ejemplo de aplicación. Los parámetros son coloreados según el ámbito de aplicación (verde – parámetros comunes según finalidad, marrón – parámetros comunes para todas las alternativas y azul – parámetros específicos para cada alternativa):

PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
$W_{1i} * \mu_{1i}$	0'095*0'99	Horas de MO de las operaciones de recogida, categorización, almacén y venta del producto i * factor regional correspondiente
PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$W_{2Ai} * \mu_{2Ai}$	0'00469*0'99	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo ocasión* factor regional correspondiente
$W_{2Bi} * \mu_{2Bi}$	0'00156*1	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo gomilla * factor regional correspondiente
$W_{2Ci} * \mu_{2Ci}$	0'00865*1	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo carcasa * factor regional correspondiente
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
$W_{3i} * \mu_{3i}$	0'00225*1	Horas de MO de las operaciones de transporte del producto i a la planta de valorización * factor regional correspondiente



**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.**

$W_{vi1} * \mu_{vi1}$	0'003*0'95	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 1 (acero) del producto i * factor regional correspondiente
$W_{vi3} * \mu_{vi3}$	0'010*0'95	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente
$W_{4i1} * \mu_{4i1}$	0'00039*0'78	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 1 (acero) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje * factor regional correspondiente
$W_{4i3} * \mu_{4i3}$	0'00392*1	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje * factor regional correspondiente
<b>Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto:</b>		
$W_{3i} * \mu_{3i}$	0'00225*1	Horas de MO de las operaciones de transporte del producto i a la planta de valorización * factor regional correspondiente
$W_{vi2} * \mu_{vi2}$	0'002*0'95	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 2 (fibra) del producto i * factor regional correspondiente
$W_{vi3} * \mu_{vi3}$	0'010*0'95	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente
$W_{5i2} * \mu_{5i2}$	0'00035*0'75	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 2 (fibra) del producto i desde la planta de valorización hasta la planta de incineración * factor regional correspondiente
$W_{5i3} * \mu_{5i3}$	0'00106*0'75	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta la planta de incineración * factor regional correspondiente
<b>PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
$W_{refi} * \mu_{refi}$	0'4167*1'05	Horas de MO de las operaciones de Reacondicionamiento del producto i * factor regional correspondiente
$W_{rec1i} * \mu_{rec1i}$	0'0833*0'78	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 1 (acero) del producto i * factor regional correspondiente
$W_{rec3i} * \mu_{rec3i}$	0'0833*0'75	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente
$W_{bur2i} * \mu_{bur2i}$	0'0167*1	Horas de MO de las operaciones de Incineración del componente 2 (fibra) del producto i * factor regional correspondiente
$W_{bur3i} * \mu_{bur3i}$	0'0167*0'75	Horas de MO de las operaciones de Incineración del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente

**Tabla 69.** Valores sociales aplicables al ejemplo de aplicación (Elaboración propia).

**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.**

A continuación, se mostrará los parámetros sociales que hacen referencia a cada alternativa y sus valores correspondientes, obteniendo el valor de impacto social de cada alternativa. Asimismo, se acompaña en cada alternativa una miniatura de la imagen anterior, destacando los parámetros aplicables a la alternativa en cuestión:

**3. Alternativas de reintroducción en el mercado:**

o **Reutilización del neumático tipo ocasión.**

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	ASPECTOS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	ASPECTOS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD	ASPECTOS SOCIALES ESPECÍFICOS
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	1. Reutilización/reventa	(Horas de MO operaciones de recogida y DD) x factor regional	(Horas de MO operaciones de transporte al punto de intervención y al nuevo cliente) x factor regional	-----
	2. Reparación			
	3. Reacondicionamiento			
	4. Remanufactura			

Las horas de MO de la alternativa de Ocasión corresponden a las horas comunes de todas las alternativas para realizar la recogida, categorización, almacén y venta ( $W_{1i} = 0'095$  h/ud) más el tiempo destinado al transporte de entrega al cliente ( $W_{2Ai} = 0'00469$

h/ud). De esta forma el trabajo correspondiente a la alternativa de “ocasión” será:  $0.095 + 0'00469 = 0'09969$  h/ud, llevándose a cabo en la provincia de Valencia ( $\mu = 0'99$ ). Por tanto, el valor del impacto social debido a la reutilización tipo ocasión será de:  $SI_{oca} = 0'09969 * 0'99 = 0'0987$ .

o **Reutilización del neumático tipo gomilla.**

FINALIDAD	ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO	ASPECTOS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS	ASPECTOS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD	ASPECTOS SOCIALES ESPECÍFICOS
REINTRODUCCIÓN EN EL MERCADO	1. Reutilización/reventa	(Horas de MO operaciones de recogida y DD) x factor regional	(Horas de MO operaciones de transporte al punto de intervención y al nuevo cliente) x factor regional	-----
	2. Reparación			
	3. Reacondicionamiento			
	4. Remanufactura			

Las horas de MO de la alternativa de Gomilla, coinciden en parte con las del apartado anterior, por tratarse de una alternativa con las mismas operaciones, en cuanto al procedimiento de recogida, categorización, reutilización y venta se refiere ( $W_{1i} = 0'095$  h/ud),

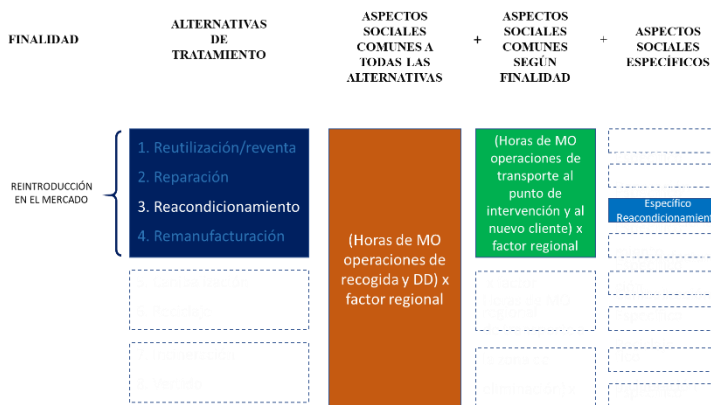
a excepción del transporte de entrega. En este caso, el tiempo destinado al transporte entre la planta de recogida y clasificación y el cliente corresponde al parámetro  $W_{2Bi}$ , que engloba el transporte por carretera ( $0'00153$  h/ud) más el transporte marítimo ( $0'00003$  h/ud), dando un total de  $W_{2Bi} = 0'00156$  h/ud. Se considera que las operaciones realizadas en la planta de recogida y clasificación se

ejecutan en la provincia de Valencia ( $\mu_{gom1}=0'99$ ) y para el transporte se adopta el valor nacional general ( $\mu_{gom2}=1$ ).

Por tanto, el valor del impacto social debido a la reutilización tipo gomilla será de:

$$\underline{\underline{SI_{gom} = (0'095 * 0'99) + (0'00156 * 1) = 0'0956.}}$$

o **Reacondicionamiento del neumático tipo carcasa.**



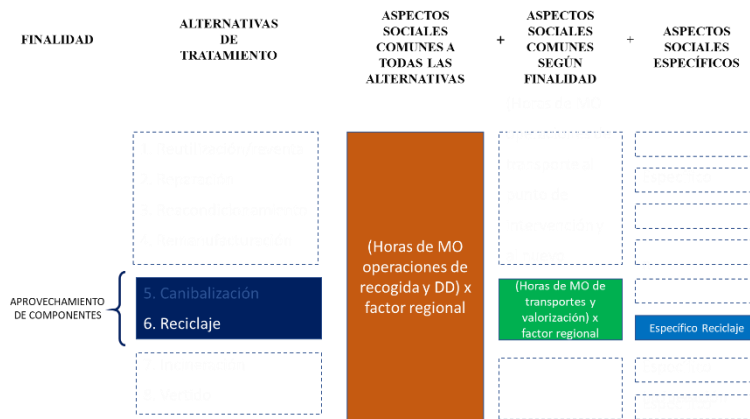
El cálculo de las horas de MO de la alternativa de carcasa considera el tiempo dedicado a cada unidad en la planta de recogida y clasificación ( $W_{1i} = 0'095$  h/ud), igual que en los apartados

anteriores, más el tiempo destinado a las operaciones de la planta recauchutadora. A este tiempo, cabe añadir el tiempo destinado a las operaciones propias de la planta de recauchutado para reacondicionar el ( $W_{refi} = 0'4167$  h/ud) para el tratamiento, teniendo en cuenta la manipulación y la intervención sobre el neumático.

Además de los dos componentes anteriores, para obtener la generación de horas de trabajos totales, se añade el tiempo preciso para el transporte entre la planta de recogida y clasificación y la planta recauchutadora y el tiempo entre esta y el nuevo cliente ( $W_{2Ci} = 0'00865$  h/ud).

Teniendo en cuenta que la planta de recogida/selección se encuentra en la provincia de Valencia ( $\mu = 0'99$ ), la planta recauchutadora en la provincia de Alicante ( $\mu = 1'05$ ) y la distribución al nuevo cliente engloba todo el mercado nacional ( $\mu = 1$ ), el valor del impacto social debido al reacondicionamiento será de:  **$SI_{ref} = (0'095 * 0'99) + (0'4167*1'05) + (0'00865*1) = 0'5402.$**

#### 4. Alternativas de aprovechamiento de Componentes.



Las horas de MO que genera cada unidad con respecto a las alternativas de aprovechamiento de componentes, se calculan teniendo en cuenta el tiempo destinado en la planta de recogida y clasificación, el tiempo

de la planta de valorización de componentes más el tiempo destinado en cada planta de tratamiento (reciclaje en este caso) más los transportes correspondientes entre ellas.

En primer lugar, se reparte el **tiempo dedicado en la planta de recogida y clasificación** por unidad, calculado anteriormente, entre los diferentes componentes del neumático, considerando el porcentaje de cada uno de los componentes sobre el producto final (20% acero, 12% fibra y 68% caucho). De esta forma, el tiempo destinado a la recepción inicial, categorización, almacenaje y venta, realizado en la planta de recogida y clasificación ( $W_{1i} = 0'095$  h/ud) quedaría de la siguiente manera:

$$W_{acero1i} = 0'095 * 0'20 = 0'019 \text{ h/ud}$$

$$W_{fibra1i} = 0'095 * 0'12 = 0'011 \text{ h/ud}$$

$$W_{caucho1i} = 0'095 * 0'68 = 0'065 \text{ h/ud}$$

Teniendo en cuenta que la planta de recogida y clasificación se encuentra en la provincia de Valencia ( $\mu = 0'99$ ):

$$SI_{acero1} = W_{acero1i} * \mu_1 = (0'019 * 0'99) = 0'0188$$

$$SI_{fibra1} = W_{fibra1i} * \mu_1 = (0'011 * 0'99) = 0'0109$$

$$SI_{caucho1} = W_{caucho1i} * \mu_1 = (0'065 * 0'99) = 0'0644$$

En segundo lugar, tal y como se ha expuesto anteriormente, la distribución de **horas por cada unidad en la planta de valorización**, según la proporción de los componentes sobre el producto final, quedaría de la siguiente manera:

$$W_{vi1} = 0'015 * 0'20 = 0'003 \text{ h/ud}$$

$$W_{vi2} = 0'015 * 0'12 = 0'002 \text{ h/ud}$$

$$W_{vi3} = 0'015 * 0'68 = 0'010 \text{ h/ud}$$

Teniendo en cuenta que la planta de valorización se encuentra en la provincia de Murcia ( $\mu = 0'95$ ):

$$SI_{acero2} = (0'003 * 0'95) = 0'00285$$

$$SI_{fibra2} = (0'002 * 0'95) = 0'0019$$

$$SI_{caucho2} = (0'010 * 0'95) = 0'0095$$

En tercer lugar, teniendo en cuenta que solamente se considera el reciclaje disponible para el acero y para el caucho, el **tiempo destinado al reciclaje de cada componente** se expone a continuación.

$$W_{acero3} = 0'0833 \text{ h/ud}$$

$$W_{caucho3rec} = 0'0833 \text{ h/ud}$$

La cuantificación de las horas de MO originadas en cada tratamiento contempla que el reciclaje del acero se realiza en la provincia de Barcelona ( $\mu = 0'78$ ). En cambio, el reciclaje del caucho se puede realizar en gran cantidad de destinos, tanto nacionales como internacionales (40% extranjero y 60 % en España), por lo que se aplica la media nacional como factor regional ( $\mu = 1$ ).

$$SI_{acero3} = W_{acero3} * \mu_{Barcelona} = (0'0833 * 0'78) = 0'065$$

$$SI_{caucho3rec} = W_{caucho3rec} * \mu_{Nacional} = (0'0833 * 1) = 0'0833$$

En último lugar, para valorar el trabajo generado por los **transportes**, se consideran los transportes entre la planta de recogida y clasificación y la planta de valorización ( $W_{3i}$ ) más el transporte entre la planta de valorización y la planta de tratamiento de reciclaje ( $W_{4ij}$ ).

$$W_{acero4} = (0'00225 * 0'2) + 0'00039 = 0'00084 \text{ h/ud}$$

$$W_{\text{caucho4rec}} = (0'00225 * 0'68) + 0'00392 = 0'00545 \text{ h/ud}$$

La categorización de las horas de MO originadas en cada tratamiento considera la aplicación de los mismos factores regionales que han sido imputados anteriormente, es decir, aquellos que hacen referencia a la provincia de destino, ya que generalmente los transportes son realizados por las plantas receptoras.

$$SI_{\text{acero4}} = W_{\text{acero4}} * \mu_{\text{Barcelona}} = (0'00084 * 0'78) = 0'00065$$

$$SI_{\text{caucho4rec}} = W_{\text{caucho4rec}} * \mu_{\text{Nacional}} = (0'00545 * 1) = 0'00545$$

De esta forma, el valor del impacto social de cada alternativa de disposición se obtiene tras sumar los valores de los distintos parámetros sociales que se generan en cada planta de intervención del producto:

$$SI_{\text{RECi1}} = SI_{\text{acero1}} + SI_{\text{acero2}} + SI_{\text{acero3}} + SI_{\text{acero4}} = 0'0188 + 0'00285 + 0'065 + 0'00065 = 0'0874$$

$$SI_{\text{RECi3}} = SI_{\text{caucho1}} + SI_{\text{caucho2}} + SI_{\text{caucho3rec}} + SI_{\text{caucho4rec}} = 0'0640 + 0'0095 + 0'0833 + 0'00545 = 0'1414$$

### 5. Alternativas de eliminación sin recuperación de valor.



planta de valorización de componentes más el tiempo destinado en cada planta de tratamiento (incineración en este caso) más los transportes correspondientes entre ellas.

Tanto el tiempo dedicado en la planta de recogida y clasificación, como el tiempo destinado en la planta de valorización, es el mismo que se ha calculado en el apartado anterior de las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes. Por tanto, el impacto social destinado a esas operaciones, teniendo

en cuenta que solamente se considera la incineración para la fibra y el caucho, son los siguientes:

- Impacto social por las operaciones realizadas en la planta de recogida y clasificación:

$$SI_{fibra1} = (0'011 * 0'99) = 0'0109$$

$$SI_{caucho1} = (0'065 * 0'99) = 0'0644$$

- Impacto social por las operaciones realizadas en la planta de valorización:

$$SI_{fibra2} = (0'002 * 0'95) = 0'0019$$

$$SI_{caucho2} = (0'010 * 0'95) = 0'0095$$

A parte de estos aspectos, cabe añadir el **tiempo destinado a la incineración de cada componente**.

$$W_{fibra3} = 0'0167 \text{ h/ud}$$

$$W_{caucho3inc} = 0'0167 \text{ h/ud}$$

La cuantificación de las horas de MO originadas en cada tratamiento contempla que, la incineración, tanto de la fibra como del caucho, se realiza en la provincia de Madrid ( $\mu = 0'75$ ), por tanto, el impacto social de dichas operaciones quedaría de la siguiente manera:

$$SI_{fibra3} = W_{fibra3} * \mu_{Madrid} = (0'0167 * 0'75) = 0'0125$$

$$SI_{caucho3inc} = W_{caucho3inc} * \mu_{Madrid} = (0'0167 * 0'75) = 0'0125$$

En último lugar, para valorar el trabajo generado por los **transportes**, se consideran los transportes entre la planta de recogida y clasificación y la planta de valorización ( $W_{3i}$ ) más el transporte entre la planta de valorización y la planta de incineración ( $W_{5ij}$ ).

$$W_{fibra4} = (0'00225 * 0'12) + 0'00035 = 0'00062 \text{ h/ud}$$

$$W_{caucho4inc} = (0'00225 * 0'68) + 0'00106 = 0'00259 \text{ h/ud}$$

La categorización de las horas de MO originadas en cada tratamiento considera la aplicación de los mismos factores regionales que han sido imputados

anteriormente, es decir, aquellos que hacen referencia a la provincia de destino, ya que generalmente los transportes son realizados por las plantas receptoras.

$$SI_{fibra4} = w_{fibra4} * \mu_{Madrid} = (0'00062 * 0'75) = 0'000465$$

$$SI_{caucho4inc} = w_{caucho4inc} * \mu_{Madrid} = (0'00259 * 0'75) = 0'0019$$

De esta forma, el valor del impacto social de cada alternativa de disposición se obtiene tras sumar los valores de los distintos parámetros sociales que se generan en cada planta de intervención del producto:

$$SI_{BURI2} = SI_{fibra1} + SI_{fibra2} + SI_{fibra3} + SI_{fibra4} = 0'0109 + 0'0019 + 0'0125 + 0'000465 = 0'0304$$

$$SI_{BURI3} = SI_{caucho1} + SI_{caucho2} + SI_{caucho3inc} + SI_{caucho4inc} = 0'0644 + 0'0095 + 0'0125 + 0'0019 = 0'0883$$

A continuación, se muestra una tabla resumen (Tabla 70) con los valores de impacto social de cada una de las alternativas de disposición:

Valores de impacto social correspondiente a cada alternativa:		
SI <sub>OCAi</sub>	0'0987	impacto social debido a la reventa del producto <i>i</i> como neumático ocasión
SI <sub>GOMi</sub>	0'09561	impacto social debido a la reventa del producto <i>i</i> como neumático gomilla
SI <sub>REFi</sub>	0'532	impacto social debido al reacondicionamiento del producto <i>i</i>
SI <sub>RECi1</sub>	0'0873	impacto social debido al reciclaje del componente 1 ( <i>acero</i> ) del producto <i>i</i>
SI <sub>BURI2</sub>	0'0258	impacto social debido a la incineración del componente 2 ( <i>fibra</i> ) del producto <i>i</i>
SI <sub>RECi3</sub>	0'1627	impacto social debido al reciclaje del componente 3 ( <i>caucho</i> ) del producto <i>i</i>
SI <sub>BURI3</sub>	0'0883	impacto social debido a la incineración del componente 3 ( <i>caucho</i> ) del producto <i>i</i>

Tabla 70. Valores de impacto social correspondientes a cada alternativa (Elaboración propia).



#### 15.2.4. Paso 4. Ponderar los factores de sostenibilidad



El último paso de la metodología de adaptación del modelo integrado genérico a cada caso particular consiste en la ponderación

de los tres factores de sostenibilidad: económico, ambiental y social. En este sentido, mediante la ponderación, se asigna la importancia que el propio decisor concede a dichos factores.

En este ejemplo de aplicación, la ponderación de los factores de sostenibilidad se estableció tras una reunión con el director de la planta de recogida y clasificación y el director de la planta de valorización.

Si bien la empresa tomó sus decisiones, en los años anteriores, en base a criterios exclusivamente económicos, los encargados reconocen que ahora quieren que los criterios ambiental y social tengan más peso en sus decisiones. Por ello, el escenario de ponderación de factores con el que se va a trabajar en el presente ejemplo de aplicación es el siguiente:

**Ponderación de factores:** 80% económicos, 15% ambientales y 5 % sociales.

#### 15.2.5. Obtención del Modelo particular integrado.

La concreción de las alternativas disponibles en el ejemplo de aplicación (Paso 1), la determinación de los parámetros aplicables a cada una de ellas (Paso 2), el cálculo de los valores asociados a cada parámetro (Paso 3) y la ponderación de los factores de sostenibilidad (Paso 4), constituyen los pasos de la metodología de adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado, compuesto por el modelo particular del PLI con el subproceso de solución y por el modelo matemático particular.

En este ejemplo de aplicación, a diferencia del caso anterior, se trata de la recuperación de un producto en una red de LI abierta, siendo empresas especialistas en tratar productos al final de su vida útil (*end-of-life*). Por ello, las primeras cuestiones que se plantean en el modelo genérico del PLI desaparecen puesto que todos los productos se tratan, no se precisa la empresa recolectora de enviar productos de sustitución y no se realiza intervención in-situ por las propias características del ejemplo de los neumáticos usados.

En el caso de ser designado como NUR para el mercado nacional, el producto se clasifica en modelo de neumático y se almacena, poniéndose a disposición del cliente en la misma planta de recogida y clasificación o realizando un transporte hasta el cliente. En cambio, cuando se cataloga como NUR de gomilla, es vendida en grandes cantidades para terceros países, por lo que no se pone a disposición del cliente en la propia planta, sino que se transporta hasta su destino en grandes cantidades.

En el momento que los neumáticos son catalogados como NFVU, son separados del resto de neumáticos almacenándose en un sitio concreto (almacén de NFVU). Una vez se han recogido cierta cantidad de neumáticos con las mismas características, son trasladados a la planta de valorización, donde se valorizan los componentes para ser tratados según sus alternativas de aprovechamiento, bien sea para reciclaje o para incineración

Consecuentemente, los principales cambios en la adaptación del modelo genérico del PLI al modelo particular del presente ejemplo de aplicación son los siguientes:

1. Las operaciones comprendidas desde el primer contacto del cliente con la empresa hasta que llega el producto a la misma se adaptan al modelo particular de la siguiente manera:
  - Se descarta la elección sobre tratar la recuperación del producto porque se trata todo el producto posible
  - No se envía producto de sustitución
  - No se realiza intervención in-situ
  - No se compensa al cliente
2. Se desdobra la alternativa de reutilización, introduciendo la decisión sobre qué tipo de reutilización a realizar, si es por el mercado nacional para el neumático de ocasión o por el mercado extranjero para el neumático tipo gomilla.
3. Adaptación del transporte previo a la intervención sobre el producto porque se realiza en las mismas instalaciones y se descarta la opción de realizar otra intervención una vez reacondicionado.

## PARTE V. APLICACIÓN.

### Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

---

4. Inclusión de almacén y transporte previo al desmontaje del producto (valorización en este ejemplo de aplicación).
5. No se plantea la alternativa de canibalización ni vertido
6. Adaptación de la alternativa de reciclaje e incineración contemplando siempre el transporte hasta el centro de reciclaje o incineración.

Para poder mostrarlo más claramente, se presenta a continuación el modelo del PLI genérico integrado (Figura 308) en el que se ha marcado los principales cambios en la adaptación. Posteriormente, se presenta el modelo del PLI particular integrado (Figura 309) adaptado al ejemplo de aplicación de los neumáticos usados.

PARTE V. APLICACIÓN.  
 Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

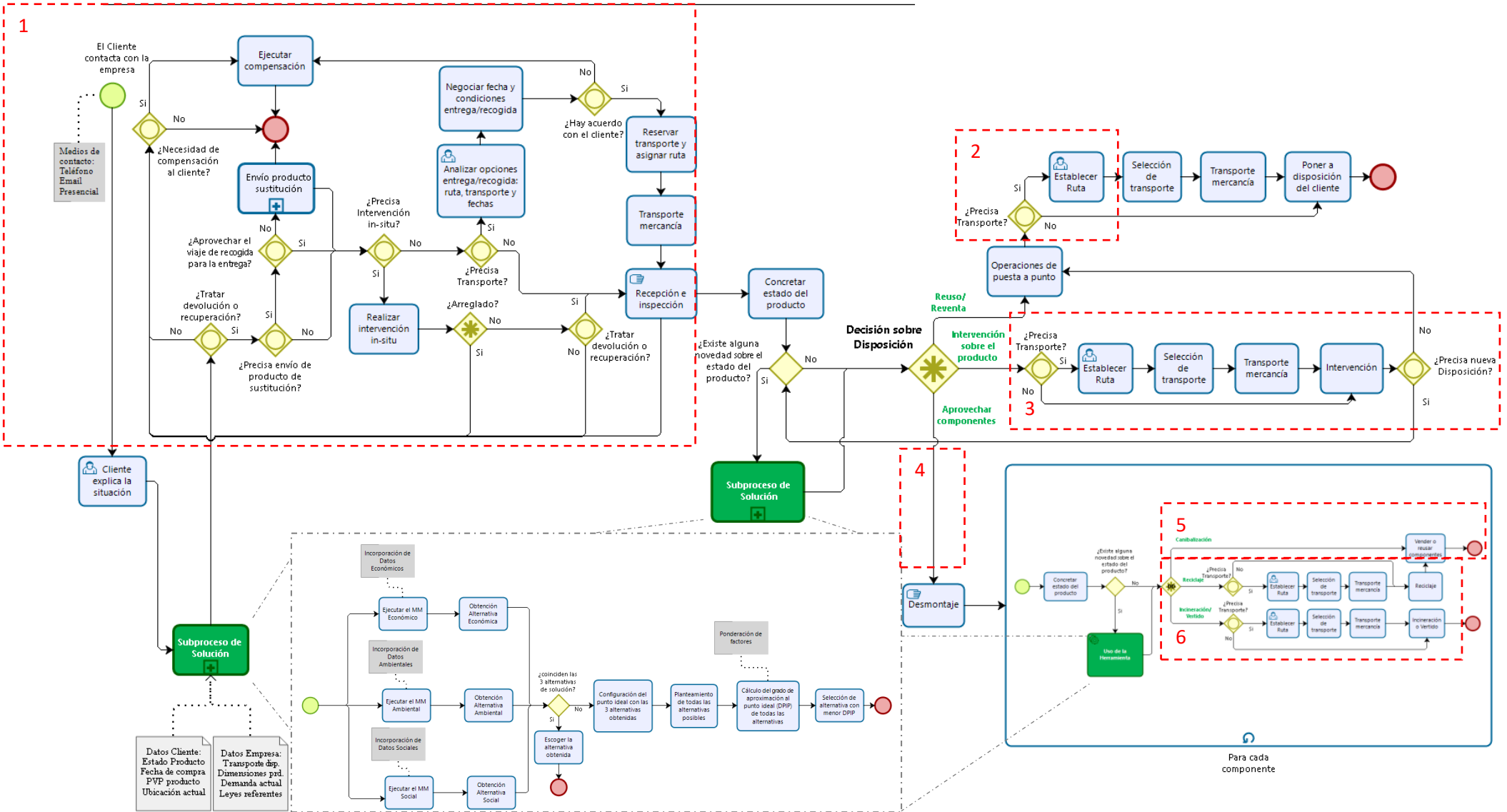


Figura 308. Modelo genérico del PLI integrado mostrando con un marco rojo indicando dónde se introducen los cambios en la adaptación (Elaboración Propia)

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

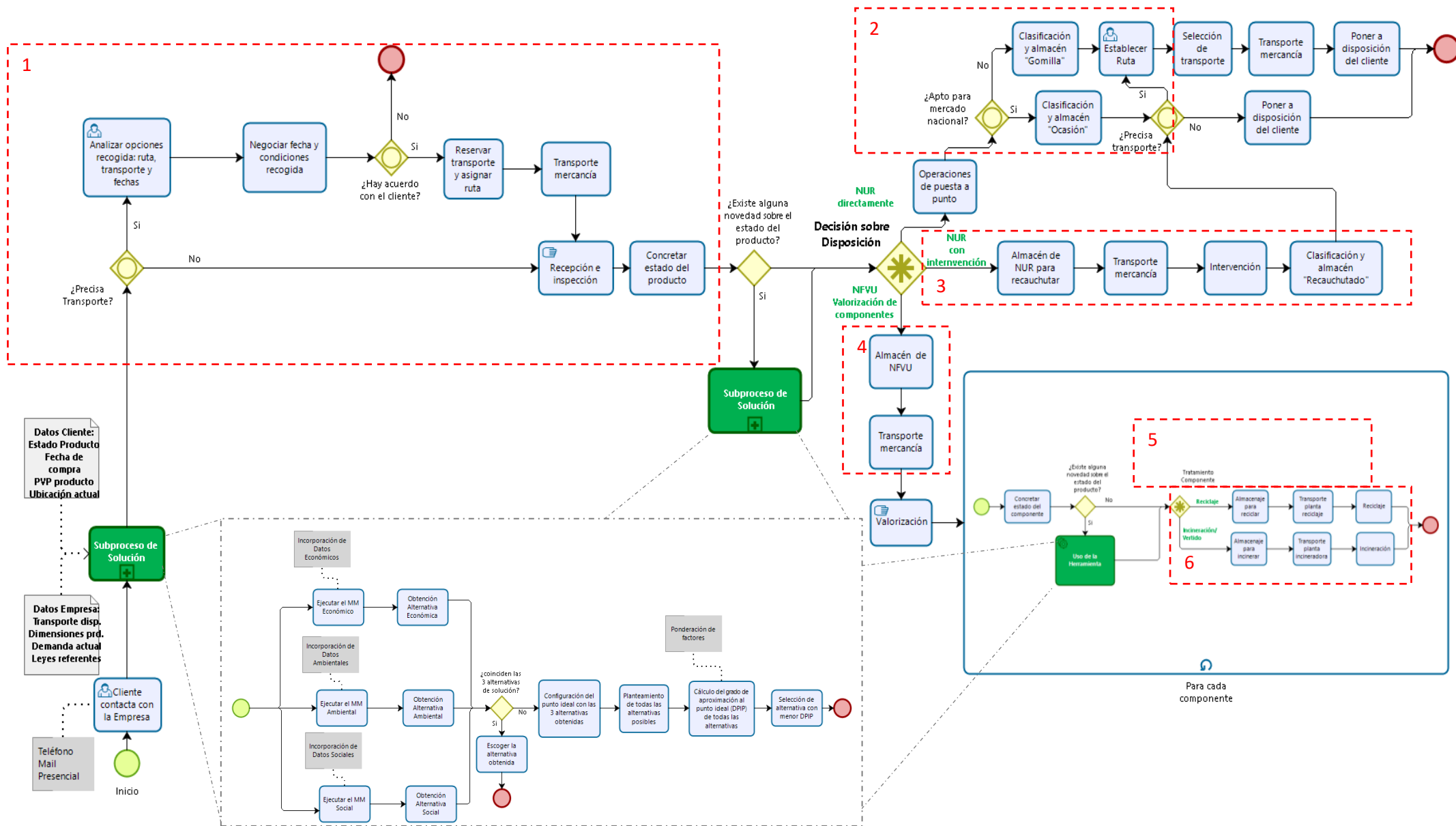


Figura 309. Modelo particular del PLI integrado con un marco rojo indicando dónde se introducen los cambios en la adaptación al ejemplo de aplicación de los neumáticos usados

(Elaboración propia)

Asimismo, se presenta como ha quedado el modelo matemático particular tras la aplicación de la metodología de adaptación:

- **Variables de decisión:**

Como se puede apreciar, se ha desdoblado la alternativa de reutilización para dar cabida al mercado secundario y se han anulado las alternativas no aplicables (reparación, refabricación, canibalización y vertido) al caso de los neumáticos usados.

<b>OCA<sub>i</sub></b>	{	1	si la decisión de disposición del producto <i>i</i> es <b>Revender como neumático de Ocasión</b>
		0	en caso contrario
<b>GOM<sub>i</sub></b>	{	1	si la decisión de disposición del producto <i>i</i> es <b>Revender como neumático de Gomilla</b>
		0	en caso contrario
<b>REF<sub>i</sub></b>	{	1	si la decisión de disposición del producto <i>i</i> es <b>Reacondicionamiento (recauchutado)</b>
		0	en caso contrario
<b>REC<sub>i,j</sub></b>	{	1	si la decisión de disposición del componente <i>j</i> del producto <i>i</i> es <b>Reciclaje</b>
		0	en caso contrario
<b>BUR<sub>i,j</sub></b>	{	1	si la decisión de disposición del componente <i>j</i> del producto <i>i</i> es <b>Incineración</b>
		1	en caso contrario

Las otras alternativas de disposición (reparación, remanufacturación, incineración y vertido) no se consideran en este ejemplo de aplicación, por lo que:

$$\mathbf{REP}_i = \mathbf{REM}_i = \mathbf{BUR}_{i,j} = \mathbf{DIS}_{i,j} = \mathbf{0}$$

**Función objetivo:**

A continuación, se presenta la función objetivo separada en tres bloques: la maximización de la rentabilidad económica (Z1), la minimización del impacto ambiental (Z2) y la maximización del impacto social (Z3). Para mostrar más claramente la adaptación al

modelo particular, primero se presentan las funciones del modelo genérico (expuestas en el Capítulo 9) y posteriormente las funciones adaptadas al caso particular.

**Maximización de la rentabilidad económica en el modelo genérico del PLI:**

$$\text{Max } Z_1 = \{ \sum_i [\text{Sreu}_i \text{REU}_i + \text{Srep}_i \text{REP}_i + \text{Sref}_i \text{REF}_i + \text{Srem}_i \text{REMI}_i] + \quad (9-1)$$

$$+ \sum_i \sum_j [\text{Scan}_{i,j} \text{CAN}_{i,j} + \text{Srec}_{i,j} \text{REC}_{i,j}] + \quad (9-2)$$

$$+ \sum_i \sum_j [\text{Sbur}_{i,j} \text{BUR}_{i,j}] + \quad (9-3)$$

$$+ \text{SUB}_{i,j} \} - \quad (9-4)$$

$$- \{ \sum_i [ \text{CP}_i + \text{CT}_{1i} + \text{COL}_i + \text{CLE}_{i,j} + \text{IS}_{i,j} ] + \quad (9-5)$$

$$+ \sum_i [ [ \text{COP}_i + \text{CS}_{1,i} + \text{CT}_{2,i} ] + [ \text{Crep}_i \text{REP}_i + \text{Cref}_i \text{REF}_i + \text{Crem}_i \text{REMI}_i ] ] \\ [ \text{REU}_i + \text{REP}_i + \text{REF}_i + \text{REMI}_i ] + \quad (9-6)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ [ \text{CL}_{i,j} + \text{CS}_{2i,j} + \text{CT}_{3i,j} ] + [ \text{Ccan}_{i,j} \text{CAN}_{i,j} + \text{Crec}_{i,j} \text{REC}_{i,j} ] ] [ \text{CAN}_{i,j} + \\ \text{REC}_{i,j} ] + \quad (9-7)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ [ \text{CS}_{3i,j} + \text{CT}_{4i,j} ] + [ (\text{Cbur}_{i,j} + \text{Crm}_{i,j}) \text{BUR}_{i,j} + \text{Cdis}_{i,j} \text{DIS}_{i,j} ] ] [ \text{BUR}_{i,j} + \\ \text{DIS}_{i,j} ] \} \quad (9-8)$$

**Maximización de la rentabilidad económica en el modelo particular del PLI:**

Se eliminan las alternativas no aplicables y los parámetros asociados, así como se introducen los parámetros modificados en el caso particular.

$$\text{Max } Z_1 = \{ \sum_i [\text{Soc}_i \text{OCA}_i + \text{Sgom}_i \text{GOM}_i + \text{Sref}_i \text{REF}_i] + \quad (15-1)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ \text{Srec}_{i,j} \text{REC}_{i,j} ] + \quad (15-2)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ \text{Sbur}_{i,j} \text{BUR}_{i,j} ] + \quad (15-3)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ \text{SUB}_{i,j} ] \} - \quad (15-4)$$

$$- \{ \sum_i [ \text{CT}_{1i} + \text{CIS}_i ] + \quad (15-5)$$

$$+ \sum_i [ [ \text{COP}_i + \text{CS}_{1,i} ] + [ \text{Coc}_i \text{OCA}_i + \text{Cgom}_i \text{GOM}_i + \text{Cref}_i \text{REF}_i ] ] [ \text{OCA}_i + \\ \text{GOM}_i + \text{REF}_i ] + \quad (15-6)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ CT_{3i,j} + CL_{i,j} + CS_{2i,j} + CT_{4i,j} + Crec_{i,j} ] [REC_{i,j}] + \quad (15-7)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ CT_{3i,j} + CL_{i,j} + CS_{2i,j} + CT_{5i,j} + Cbur_{i,j} + Crmi_{i,j} ] [BUR_{i,j}] \quad (15-8)$$

**Minimización del impacto ambiental en el modelo genérico del PLI:**

$$\text{Min } Z_2 = \sum_i EIT_{1i} + \quad (9-9)$$

$$+ \sum_i [ EIT_{2i} + [ EIT_{3i} (REP_i + REF_i + REM_i) + EIP_{1i} REP_i + EIP_{2i} REF_i + EIP_{3i} REM_i ] ] [REU_i + REP_i + REF_i + REM_i] + \quad (9-10)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ EIT_{4i,j} + EIP_{4i,j} CAN_{i,j} + EIR_{i,j} REC_{i,j} ] [ CAN_{i,j} + REC_{i,j} ] + \quad (9-11)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ EIT_{5i,j} + EII_{i,j} BUR_{i,j} + EIL_{i,j} DIS_{i,j} ] [ BUR_{i,j} + DIS_{i,j} ] \quad (9-12)$$

**Minimización del impacto ambiental en el modelo particular del PLI:**

Se eliminan los parámetros ambientales referentes a las alternativas no aplicables y a las operaciones asociadas, así como se introducen los parámetros modificados en el caso particular.

$$\text{Min } Z_2 = \sum_i EIT_{1i} + \quad (15-9)$$

$$+ \sum_i [ [EIT_{2Ai} OCA_i ] + [EIT_{2Bi} GOM_i ] + [ (EIT_{2Ci} + EIP_{1i}) REF_i ] ] [OCA_i + GOM_i + REF_i] + \quad (15-10)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ [EIT_{3i,j} + EIP_{2i,j} + EIT_{4i,j} + EIR_{i,j} ] REC_{i,j} ] + \quad (15-11)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ [EIT_{3i,j} + EIP_{2i,j} + EIT_{5i,j} + EII_{i,j} ] BUR_{i,j} ] \quad (15-12)$$

**Maximización del impacto social en el modelo genérico del PLI:**

$$\text{Max } Z_3 = \sum_i (W_{1i} * \mu_{1i}) + \quad (9-13)$$

$$+ \sum_i [ (W_{2i} * \mu_{2i}) + [ (W_{3i} * \mu_{3i}) (REP_i + REF_i + REM_i) + (W_{rep_i} * \mu_{rep_i}) * REP_i + (W_{ref_i} * \mu_{ref_i}) * REF_i + (W_{rem_i} * \mu_{rem_i}) * REM_i ] ] [REU_i + REP_i + REF_i + REM_i] + \quad (9-14)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ (W_{4i,j} * \mu_{4i,j}) + (W_{can_{i,j}} * \mu_{can_{i,j}}) * CAN_{i,j} + (W_{rec_{i,j}} * \mu_{rec_{i,j}}) * REC_{i,j} ] [ CAN_{i,j} + REC_{i,j} ] + \quad (9-15)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ (W_{5i,j} * \mu_{5i,j}) + (W_{bur_{i,j}} * \mu_{bur_{i,j}}) * BUR_{i,j} + (W_{dis_{i,j}} * \mu_{dis_{i,j}}) * DIS_{i,j} ] [ BUR_{i,j} + DIS_{i,j} ] \quad (9-16)$$

• **Maximización del impacto social en el modelo particular del PLI:**

Se eliminan los parámetros sociales de las alternativas no aplicables en el caso particular.

$$\text{Max } Z_3 = \sum_i (W_{1i} * \mu_{1i}) + \quad (15-13)$$



$$+ \sum_i [ (W_{2i} * \mu_{2i}) + [(W_{2Ai} * \mu_{2Ai}) * OCA_i] + [(W_{2Bi} * \mu_{2Bi}) * GOM_i] + \\ + [((W_{2Ci} * \mu_{2Ci}) + (W_{refi} * \mu_{refi})) REF_i ] ] [OCA_i + GOM_i + REF_i] + \quad (15-14)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ [(W_{3ij} * \mu_{3ij}) + (W_{vij} * \mu_{vij}) + (W_{4ij} * \mu_{4ij}) + (W_{recij} * \mu_{recij})] REC_{i,j} ] + \quad (15-15)$$

$$+ \sum_i \sum_j [ [(W_{3ij} * \mu_{3ij}) + (W_{vij} * \mu_{vij}) + (W_{5ij} * \mu_{5ij}) + (W_{burij} * \mu_{burij})] BUR_{i,j} ] \quad (15-16)$$

El modelo particular **maximiza la rentabilidad económica** basándose, inicialmente, en los ingresos obtenidos a través de diferentes alternativas de disposición, dependiendo de si se reintroducen en el mercado (15-1), si se aprovechan los componentes a través del reciclaje (15-2) o de la incineración (15-3), con los posibles ingresos de subvenciones por tratar los componentes de los neumáticos (15-4).

A esta serie de ingresos, se deben descontar los costes incurridos de acuerdo con la disposición aplicada, considerando los costes comunes a todas las alternativas (15-5), los costes correspondientes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (15-6), los costes correspondientes a la alternativa de reciclaje de los componentes (15-7) y los correspondientes a la incineración (15-8).

Asimismo, el modelo busca **minimizar el impacto ambiental** basado en las acciones correspondientes a las diferentes alternativas de disposición, de acuerdo con el impacto ambiental común a todas las alternativas (15-9), las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado (15-10), el impacto correspondiente a la alternativa de reciclar los componentes (15-11) o incinerarlos (15-12).

Además, el modelo pretende **maximizar el impacto social** basado en las acciones comunes a todas las alternativas (15-13), acciones comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción del producto en el mercado (15-14), acciones correspondientes a la alternativa de reciclaje (15-15) y acciones de la alternativa de incineración (15-16).

### Restricciones:

A continuación, se muestran las restricciones del modelo matemático genérico:

$$\sum_{i=1}^I (REU_i + REP_i + REF_i + REM_i + \frac{\sum_{j=1}^J CAN_{i,j}}{J} + \frac{\sum_{j=1}^J REC_{i,j}}{J} + \frac{\sum_{j=1}^J BUR_{i,j}}{J} + \frac{\sum_{j=1}^J DIS_{i,j}}{J}) = 1; \forall_{i,j} \quad (9-17)$$

En la adaptación al modelo particular, se cumple que, cuando el producto se trata sin desmontar, tenga sólo una disposición y que, cuando el producto se desensambla en componentes, estos se puedan reciclar o incinerar, limitando las alternativas a aquellas que son aplicables, según la siguiente restricción

$$\sum_{i=1}^I (\text{OCA}_i + \text{GOM}_i + \text{REF}_i + \frac{\sum_{j=1}^J \text{REC}_{ij}}{J} + \frac{\sum_{j=1}^J \text{BUR}_{ij}}{J}) = 1; \forall i,j \quad (15-17)$$

Una vez aplicada la metodología para la adaptación del modelo genérico integrado al modelo particular integrado, se ha obtenido el modelo del PLI y el modelo matemático adaptados al ejemplo de aplicación. Con toda esta información ya se está en disposición de recuperar productos y determinar en cada caso la mejor alternativa de disposición. Para facilitar dicha tarea a la empresa, se va a desarrollar a continuación un manual de usuario que facilite la operabilidad por parte del personal decisor de la empresa. Se utilizarán los valores calculados en el presente apartado como ejemplo genérico para ilustrar cómo funciona el manual de usuario.

### **15.3. Desarrollo del manual de usuario para la gestión de las recuperaciones**

Todo lo desarrollado hasta aquí, en el presente capítulo, tendría por objetivo el desarrollo del modelo integrado particular. Este trabajo correspondería a un rol de desarrollador/consultor que se ocuparía normalmente de adaptar los modelos genéricos del MR a cada caso concreto.

Una vez desarrollado el modelo particular, este estaría listo para su utilización en el día a día de la empresa. En este caso, el modelo desarrollado, permitiría tomar la decisión más sostenible posible para cada neumático usado en la gestión diaria de la empresa, pero faltaría parametrizar los valores en función de cada producto recuperado. Este trabajo más cotidiano de uso y parametrización de la herramienta se llevaría a cabo, normalmente, por el departamento comercial, ventas, atención al cliente, etc. que debería recibir la correspondiente formación por parte del desarrollador/consultor en el uso de la herramienta.

Con el objetivo de acompañar y complementar esta labor de formación, a continuación, se incluye el manual de usuario (o guía de utilización) de la herramienta matemática.

### 15.3.1. Manual de usuario para la gestión de las recuperaciones.

De la misma forma que pasaba en el ejemplo de los sillones de relax (Apartado 15.3.1), el manual de usuario servirá como guía para el personal de la empresa a la hora de determinar la mejor alternativa de disposición.

Para ello, se deben conocer previamente cuáles de los parámetros del modelo matemático son designados como datos fijos y cuáles son datos variables.

A continuación, se muestran tres tablas (Tabla 71, Tabla 72 y Tabla 73) con los parámetros económicos, ambientales y sociales del ejemplo básico de los neumáticos usados, categorizados entre fijos y variables. Para ello, los fijos son marcados con una “F” sobre un fondo rosa y, los variables, con una “V” sobre un fondo naranja.

INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>Soca<sub>i</sub></b>	ingresos por reutilización del producto <i>i</i> como neumático de ocasión	V
<b>Sgom<sub>i</sub></b>	ingresos por reutilización del producto <i>i</i> neumático de gomilla	V
<b>Sref<sub>i</sub></b>	ingresos por reacondicionamiento del producto <i>i</i>	V
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Srec<sub>i,1</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 1 (acero) obtenido del producto <i>i</i>	F
<b>Srec<sub>i,3</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 3 (caucho) obtenido del producto <i>i</i>	F
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:		
<b>Sbur<sub>i,2</sub></b>	ingresos por incineración del componente 2 (fibra) obtenido de producto <i>i</i>	F
<b>Sbur<sub>i,3</sub></b>	ingresos por incineración del componente 3 (caucho) obtenido de producto <i>i</i>	F
OTROS INGRESOS COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
<b>SUB<sub>i</sub></b>	ingresos obtenidos por subvención de gestión del producto <i>i</i>	F
COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
<b>CT<sub>li</sub></b>	coste de transporte del producto <i>i</i> desde el cliente hasta la empresa	V
<b>CIS<sub>i</sub></b>	coste de inspección y clasificación del producto <i>i</i>	F
COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>COP<sub>i</sub></b>	coste de embalaje del producto <i>i</i> para reutilización o reventa	F
<b>CS<sub>li</sub></b>	coste de almacenaje del producto <i>i</i> antes de la reutilización o reventa	V
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>CT<sub>3i,1</sub></b>	coste de transporte del componente 1 (acero) del producto <i>i</i> antes de ser desensamblado para reciclaje	F
<b>CT<sub>3i,3</sub></b>	coste de transporte del componente 3 (caucho) del producto <i>i</i> antes de ser desensamblado para reciclaje	F
<b>CL<sub>i,1</sub></b>	coste de troceado del componente 1 (acero) del producto <i>i</i> antes de ser destinado para reciclaje o incineración ( <b>valorización Fase I</b> )	F

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

<b>CL<sub>i,3</sub></b>	coste de troceado del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser destinado para reciclaje ( <b>valorización Fase I</b> )	F
<b>CS<sub>2i,1</sub></b>	coste de granulado del componente 1 (acero) del producto i después de ser desensamblado para reciclaje ( <b>valorización Fase II</b> )	F
<b>CS<sub>2i,3</sub></b>	coste de granulado del componente 3 (caucho) del producto i después de ser desensamblado para reciclaje ( <b>valorización Fase II</b> )	F
<b>CT<sub>4i,1</sub></b>	coste de transporte específico de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i	F
<b>CT<sub>4i,3</sub></b>	coste de transporte específico de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i	F
<b>Costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:</b>		
<b>CT<sub>3i,2</sub></b>	coste de transporte del componente 2 (fibra) del producto i antes de ser desensamblado para incineración	F
<b>CT<sub>3i,3</sub></b>	coste de transporte del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser desensamblado para incineración	F
<b>CL<sub>i,2</sub></b>	coste de troceado del componente 2 (fibra) del producto i antes de ser destinado para incineración ( <b>valorización Fase I</b> )	F
<b>CL<sub>i,3</sub></b>	coste de troceado del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser destinado para incineración ( <b>valorización Fase I</b> )	F
<b>CS<sub>2i,2</sub></b>	coste de granulado del componente 2 (fibra) del producto i después de ser desensamblado para incineración ( <b>valorización Fase II</b> )	F
<b>CS<sub>2i,3</sub></b>	coste de granulado del componente 3 (caucho) del producto i después de ser desensamblado para incineración ( <b>valorización Fase II</b> )	F
<b>CT<sub>5i,2</sub></b>	coste de transporte específico de incineración del componente 2 (fibra) del producto i	F
<b>CT<sub>5i,3</sub></b>	coste de transporte específico de incineración del componente 3 (caucho) del producto i	F
<b>Costes específicos de cada alternativa de disposición</b>		
<b>Coca<sub>i</sub></b>	costes por reutilización del producto i como neumático de ocasión	V
<b>Cgom<sub>i</sub></b>	costes por reutilización del producto i neumático de gomilla	V
<b>Cref<sub>i</sub></b>	coste de reacondicionamiento del producto i	V
<b>Crec<sub>i,1</sub></b>	coste de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i	F
<b>Crec<sub>i,3</sub></b>	coste de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i	F
<b>Cbur<sub>i,j</sub></b>	coste de incineración del componente j del producto i	F
<b>Crm<sub>i,j</sub></b>	coste de gestión de los residuos del componente j del producto i	F

**Tabla 71.** Parámetros económicos aplicables al ejemplo de los neumáticos usados con la distinción de fijos y variables (Elaboración propia).

<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>EIT<sub>1i</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	V
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>EIT<sub>2Ai</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de ocasión	V

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

<b>EIT<sub>2Bi</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de gomilla (mercado secundario)	V
<b>EIT<sub>2Ci</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de carcasa (recauchutado)	V
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>EIT<sub>3i1</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 1(acero) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	F
<b>EIT<sub>3i33</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3(caucho) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	F
<b>EIP<sub>2i,1</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 1 (acero) del producto i	F
<b>EIP<sub>2i,3</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 3 (caucho) del producto i	F
<b>EIT<sub>4i,1</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 1 (acero) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje	F
<b>EIT<sub>4i,3</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje	F
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto:		
<b>EIT<sub>3i2</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 2(fibra) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	F
<b>EIT<sub>3i33</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3(caucho) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	F
<b>EIP<sub>2i,2</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 2 (fibra) del producto i	F
<b>EIP<sub>2i,3</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 3 (caucho) del producto i	F
<b>EIT<sub>5i,2</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 2 (fibra) del producto i la planta de valorización hasta el centro eliminación por incineración	F
<b>EIT<sub>5i,3</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3 (caucho) del producto i la planta de valorización hasta el centro eliminación por incineración	F
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
<b>EIP<sub>i1</sub></b>	impacto ambiental de reacondicionamiento del producto i	V
<b>EIR<sub>i,1</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i	F
<b>EIR<sub>i,3</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i	F
<b>EII<sub>i,2</sub></b>	impacto ambiental de incineración del componente 2 (fibra) del producto i	F
<b>EII<sub>i,3</sub></b>	impacto ambiental de incineración del componente 3 (caucho) del producto i	F

**Tabla 72.** Parámetros ambientales aplicables al ejemplo de los neumáticos usados con la distinción de fijos y variables (Elaboración propia).

<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>W<sub>li</sub>*μ<sub>li</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de recogida, categorización, almacén y venta del producto i * factor regional correspondiente	V
<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$W_{2Ai} * \mu_{2Ai}$	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo ocasión * factor regional correspondiente	V
$W_{2Bi} * \mu_{2Bi}$	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo gomilla * factor regional correspondiente	V
$W_{2Ci} * \mu_{2Ci}$	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo carcasa * factor regional correspondiente	V
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
$W_{3i} * \mu_{3i}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del producto i a la planta de valorización * factor regional correspondiente	F
$W_{vi1} * \mu_{vi1}$	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 1 (acero) del producto i * factor regional correspondiente	F
$W_{vi3} * \mu_{vi3}$	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	F
$W_{4i1} * \mu_{4i1}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 1 (acero) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje * factor regional correspondiente	F
$W_{4i3} * \mu_{4i3}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje * factor regional correspondiente	F
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto:		
$W_{3i} * \mu_{3i}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del producto i a la planta de valorización * factor regional correspondiente	F
$W_{vi2} * \mu_{vi2}$	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 2 (fibra) del producto i * factor regional correspondiente	F
$W_{vi3} * \mu_{vi3}$	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	F
$W_{5i2} * \mu_{5i2}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 2 (fibra) del producto i desde la planta de valorización hasta la planta de incineración * factor regional correspondiente	F
$W_{5i3} * \mu_{5i3}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta la planta de incineración * factor regional correspondiente	F
PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
$W_{ref_i} * \mu_{ref_i}$	Horas de MO de las operaciones de Reacondicionamiento del producto i * factor regional correspondiente	V
$W_{rec_{i1}} * \mu_{rec_{i1}}$	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 1 (acero) del producto i * factor regional correspondiente	F
$W_{rec_{i3}} * \mu_{rec_{i3}}$	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	F
$W_{bur_{i2}} * \mu_{bur_{i2}}$	Horas de MO de las operaciones de Incineración del componente 2 (fibra) del producto i * factor regional correspondiente	F
$W_{bur_{i3}} * \mu_{bur_{i3}}$	Horas de MO de las operaciones de Incineración del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	F

**Tabla 73.** Parámetros sociales aplicables al ejemplo de los neumáticos usados con la distinción de fijos y variables (Elaboración propia).

Teniendo claro los parámetros que corresponden a los datos fijos y a los datos variables, así como el funcionamiento del modelo particular integrado, se está en disposición de ejecutar la herramienta con ayuda del manual de usuario para la gestión de recuperaciones. Dicho manual de usuario contendrá los siguientes pasos:

1. **Anotar toda la información que nos aporta el cliente, respecto al estado del producto, fecha de compra, coste o precio de adquisición y lugar en el que se encuentra.**
2. **Concretar las alternativas de disposición que no son viables para cada producto en cuestión,** las cuales no serán contempladas en la aplicación de la herramienta. En el caso de los neumáticos, por ejemplo, si el producto no cumple la normativa nacional, no se contemplará la reutilización o reventa como neumático de ocasión como alternativa viable.
3. **Calcular los valores de cada dimensión de sostenibilidad:**

Toda la información obtenida en los pasos anteriores sirve para calcular los valores fijos y variables de la herramienta:

- a. **Valores fijos:** Se pueden tomar como referencia, los valores calculados en la metodología de adaptación del modelo genérico al modelo particular y, en base a la información aportada por el cliente y la información que maneja la empresa, determinar si los valores fijos con los que cuenta el ejemplo básico y general se deben modificar o no.
  - b. **Valores variables:** En base a la información aportada por el cliente y los datos que maneja la empresa, se calculan los valores, considerados variables, en cada producto.
4. **Obtener la alternativa de disposición más adecuada mediante la ejecución del subproceso de solución.** En el apartado siguiente, se muestra la ejecución del subproceso de solución aplicado al ejemplo genérico utilizado para calcular los valores de referencia.

#### 15.3.2. Ejecución del subproceso de solución.

Las características técnicas para realizar la ejecución del subproceso de solución, en el presente ejemplo de aplicación, no requieren de gran inversión en recursos tecnológicos. El software utilizado para resolver el modelo matemático ha sido una versión gratuita del programa MPL, versión 5.0.8 para Windows, en un entorno de Microsoft Windows 10 home a 64 bits, con un procesador Intel(R) Core (TM) i3. El tiempo medio de cálculo ha sido menor a un minuto.

Las bases de Datos, de entrada y salida de Datos, conectada con el software MPL, para cada ejemplo de aplicación se ha realizado a través de la aplicación Acces de Microsoft Office, en su versión 365 ProPlus.

### 15.3.2.1. Valores económicos

En el apartado anterior, se ha adaptado el modelo matemático genérico al caso real objeto de estudio y se han obtenido los valores de la rentabilidad económica correspondientes a cada alternativa de disposición. En este sentido, tal y como se ha justificado, las alternativas de producto completo, con reintroducción en el mercado, son tres (**OCA** - ocasión, **GOM** - gomilla y **REF** - recauchutado) y se trabaja con tres componentes que no tienen opción de todas las alternativas, pues el componente 1 (acero) sólo se contempla el reciclaje (**REC**), el componente 2 (fibra) sólo se plantea la incineración (**BUR**) y para el componente 3 (caucho) se plantea bien la incineración o bien el reciclaje.

Una vez calculados los valores económicos (según el apartado 14.2.3), se introducen en la BBDD correspondiente al modelo matemático económico. Como se puede apreciar en la figura siguiente (Figura 310): en el cuadrante superior izquierdo (color marrón), se introducen los valores económicos de las alternativas de tratamiento del producto en su conjunto y en el cuadrante inferior izquierdo (color verde), los valores económicos correspondientes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes, de manera que hay una fila para cada componente y una columna para cada ingreso/coste. En la parte derecha de la BBDD, se muestran las alternativas de tratamiento posibles (parte superior – azul, las alternativas del producto en conjunto; parte inferior – amarillo, alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes). Tras ejecutar el software MPL con el solucionador CPLEX, se indica la alternativa seleccionada en la misma BBDD (en el anexo del presente capítulo, Anexo 15.8.1, se encuentra el archivo en lenguaje MPL de parámetros económicos correspondiente):

IdProd1	Soca	Sgom	Sref	SUBi	CT1	CIS	COP	CS1	Coca	Cgon	Cref	OCASIO	GOMILU	REFURBI
Prod1	10	4	30	0,375	0,398	0,11	0,25	0,4	0,375	0,794	14,492	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
IdComj	Srec	Sbur	SUBij	CT3	CL	CS2	CT4	Crec	CT5	Cbur	Crm	RECYCLE	BURNING	
Comp1	0,275	0	0,075	0,032	0,068	0,078	0,031	0,001	0	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Comp2	0	0	0,045	0,019	0,041	0,047	0	0	0,028	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Comp3	1,352	0,153	0,255	0,11	0,23	0,265	0,392	0,001	0,085	0	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

**Figura 310.** BBDD del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados (Elaboración propia)

Además, desde el software MPL se puede obtener un archivo de solución, donde se observa información sobre la solución encontrada. Información como puede ser el valor



de resultado óptimo y la alternativa escogida, entre otras cosas, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 311):

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentMode1BBDD
Filename: RLTM8BDDec.mpl
Date: September 2, 2020
Time: 13:18
Parsing time: 3.65 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 14.7250003666
MIP best bound: 15.2330003679
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 3
Variables: 9
Integers: 9
Nonzeros: 15
Density: 56 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 14.7250

DECISION VARIABLES
VARIABLE REF[i] :
-----
Variable Name Activity
-----
REF=0 1.0000
-----

```

**Figura 311.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados (Elaboración propia)

En base al resultado de la simulación, la alternativa correspondiente al recauchutado (*REF - refurbishment*) se sitúa como la alternativa de disposición más rentable económicamente, con un resultado de **14'725 €/ud**. De este resultado se desprende la idoneidad de destinar los neumáticos recuperados como material a ser reacondicionado y puesto de nuevo en el mercado tras un tratamiento de recauchutado.

El problema que se puede encontrar la planta de recogida y clasificación es que depende de la demanda de la planta recauchutadora, y no siempre es lo suficientemente elevada para poder destinarle todos los productos recuperados.

En el caso que no se pueda destinar el producto recuperado como producto reacondicionado, o de carcasa, se introduce en el lenguaje MPL la anulación de la variable correspondiente al reacondicionamiento (*REF=0*) y el sistema arroja la siguiente solución, donde se muestra el neumático de “ocasión” como alternativa más idónea con un resultado de **8'842 €/ud**:

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BBDD
Filename:          RLTHBDDDec.mpl
Date:              September 2, 2020
Time:              14:58
Parsing time:      3.49 sec
MPL version:       5.0.8.116
Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   8.84199999273
MIP best bound:    9.34999999404
Integer nodes:     0
Improving nodes:  0
Iterations:        0
Solution time:     0.00 sec
Solver result:     Optimal integer solution found
Result code:       101
Constraints:        3
Variables:          9
Integers:           9
Nonzeros:          15
Density:           56 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 8.8420

DECISION VARIABLES
VARIABLE OCA[i] :

Variable Name      Activity
-----
OCAPro             1.0000
    
```

Figura 312. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados con REF=0 (Elaboración propia)

Asimismo, para que el neumático se pueda destinar como “ocasión” debe cumplir unas características específicas en base a la legislación actual, que si no se cumplen se puede anular en la simulación la alternativa de ocasión ( $OCA=0$ ) y el resultado sería destinar el neumático como neumático de gomilla, con un beneficio de **2'423 €/ud**, como se aprecia en la figura siguiente:

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode1BBDD
Filename:          RLTHBDDDec.mpl
Date:              September 2, 2020
Time:              15:00
Parsing time:      2.80 sec
MPL version:       5.0.8.116
Solver name:       CPLEX (11.2.1)
Objective value:   2.42299996316
MIP best bound:    2.93099996448
Integer nodes:     0
Improving nodes:  0
Iterations:        0
Solution time:     0.00 sec
Solver result:     Optimal integer solution found
Result code:       101
Constraints:        3
Variables:          9
Integers:           8
Nonzeros:          15
Density:           56 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 2.4230

DECISION VARIABLES
VARIABLE GOM[i] :

Variable Name      Activity
-----
GOMPro             1.0000
    
```

Figura 313. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados con REF=OCA= 0 (Elaboración propia)

En este sentido, dicha alternativa también depende, en gran medida, de la demanda de ese tipo de mercado. En el caso que no se pudiera destinar a ese tipo de mercados (**GOM = 0**), no quedaría disponible ninguna alternativa de reintroducción del producto en el mercado, por tanto, a la hora de tener que valorizar los productos y aprovechar los componentes, el resultado sería el siguiente: Reciclaje de los componentes 1 y 3 (acero y caucho) e incineración del componente 2 (fibra), con un beneficio de **0'1510 €/ud.**

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentModel1BBDD
Filename: RL1MBDDDec.mpl
Date: September 2, 2020
Time: 15:04
Parsing time: 3.14 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 0.151000017533
MIP best bound: 0.659000018844
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 3
Variables: 9
Integers: 8
Nonzeros: 15
Density: 56 %
SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX Beneficio = 0.1510
DECISION VARIABLES
VARIABLE REC[i,j] :
Variable Name Activity
-----
RECProCom 1.0000
RECProCom .
RECProCom 1.0000
-----
VARIABLE BUR[i,j] :
Variable Name Activity
-----
BURProCom .
BURProCom 1.0000
BURProCom .
-----

```

Figura 314. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático económico del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados con REF=OUT=GOM= 0 (Elaboración propia)

Tal y como se puede apreciar en el resultado ofrecido por el programa, en estos casos, el margen de beneficio es muy reducido, por lo que habrá que controlar muy bien todos los costes, así como negociar un aumento de ingresos, tanto por venta como por aportaciones de las administraciones públicas para mejorar su rentabilidad.

**15.3.2.2. Valores ambientales**

Una vez obtenidos los valores del impacto **ambiental** de cada alternativa de disposición, se adaptará el modelo al caso real. Igual que en el caso anterior, las alternativas de producto completo, con reintroducción en el mercado, son ocasión, gomilla y recauchutado y se trabaja con 3 componentes que no tienen opción de todas las alternativas, según se puede apreciar en el archivo MPL de parámetros ambientales

## PARTE V. APLICACIÓN.

### Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

situado en el anexo del presente capítulo, igual que se ha procedido en los valores económicos.

Una vez introducidos los valores calculados en la BBDD correspondiente, se ejecuta el software MPL con el solucionador CPLEX, indicando la alternativa seleccionada en la misma BBDD, tal y como se puede apreciar en la figura siguiente (Figura 315):

IdProduct	EIT1	EIT2A	EIT2B	EIT2C	EIP1	OCASION	GOMILLA	REFURBIS
Prod1	0,000081	0,00031	0,01578	0,00162	0,00116	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

IdCompone	EIT3	EIT4	EIT5	EIP2	EIR	EII	RECYCLE	BURNING
Comp1	0,000076	9,652E-05		1,304E-06	0,00012		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	0,0000456		6,475E-05	7,8E-07		-0,00057	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	0,0002584	0,00092	0,00026	0,0000044	0,00012	0,06547	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figura 315. BBDD del modelo matemático ambiental del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados

(Elaboración propia)

Además, desde el software MPL se obtiene el archivo de solución, donde se aporta más información sobre la solución encontrada, como el valor de resultado óptimo y la alternativa escogida, entre otras cosas, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 316):

```
MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentMode18BDDamb
Filename:         RL18BDDamb.mpl
Date:            July 31, 2019
Time:            11:19
Parsing time:     4.94 sec
MPL version:     5.0.8.116
Solver name:     CPLEX (11.2.1)
Objective value: 0.000391000001400
MIP best bound:  0.000310000003083
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:      0
Solution time:   0.00 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:     101
Constraints:     4
Variables:      11
Integers:       11
Nonzeros:       20
Density:        45 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIP EnvironmentalImp = 0.0004

DECISION VARIABLES
VARIABLE OCA[i]:

-----
Variable Name      Activity
-----
OCAProd           1.0000
-----
```

Figura 316. Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados (Elaboración propia)

Como era previsible, la alternativa más apropiada desde la perspectiva ambiental es la reintroducción en el mercado como **neumático de ocasión** con un valor de 0'0004 puntos,

ya que en este caso no se interviene sobre el producto y la distancia entre la planta de recogida y clasificación y el nuevo cliente es relativamente corta, comparada por ejemplo con la alternativa de gomilla.

En este sentido, habrá veces que el neumático no podrá ser reintroducido en el mercado como de ocasión. La simulación de dicho escenario se realiza introduciendo en el lenguaje MPL el valor nulo para la variable de decisión de ocasión ( $OCA = 0$ ). Bajo esta premisa, el resultado aportado por el software MPL sería el siguiente:

```

MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name: ReverseLogisticTreatmentMode1BDDamb
Filename: RLTHBDDamb.mpl
Date: July 31, 2019
Time: 11:24
Parsing time: 2.81 sec
MPL version: 5.0.8.116
Solver name: CPLEX (11.2.1)
Objective value: 0.00121875402436
MIP best bound: 0.00113775402605
Integer nodes: 0
Improving nodes: 0
Iterations: 0
Solution time: 0.00 sec
Solver result: Optimal integer solution found
Result code: 101
Constraints: 4
Variables: 11
Integers: 11
Nonzeros: 20
Density: 45 %
SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MIN EnvironmentalImp 0.0012
DECISION VARIABLES
VARIABLE REC[i,j] :
Variable Name Activity
-----
RECProCom 1.0000
RECProCom -
RECProCom 1.0000
-----
VARIABLE BUR[i,j] :
Variable Name Activity
-----
BURProCom -
BURProCom 1.0000
BURProCom -

```

**Figura 317.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático ambiental del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados con  $OCA=0$  (Elaboración propia)

En este caso sería ambientalmente más interesante pasar a valorizar el producto y aprovechar los componentes con una valoración de 0'0012 puntos, reciclando el acero y el caucho e incinerando la fibra.

### 15.3.2.3. Valores sociales

Mediante los valores del impacto social obtenidos para cada alternativa de disposición, se procede a adaptar el modelo al caso real objeto de estudio. En este sentido la adaptación del modelo se puede apreciar en el archivo MPL de parámetros sociales situado en el anexo del presente capítulo (Apartado 15.8.3).

## PARTE V. APLICACIÓN.

### Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

Una vez introducidos los valores calculados en la BBDD, se puede ejecutar el programa MPL con el solucionador CPLEX, indicando la solución en la BBDD, tal y como se aprecia a continuación (Figura 318):

IdProduct	SI1	SI2A	SI2B	SI2C	SIREF	OCASION	GOMILLA	REFURBIS
Prod1	0,0941	0,0046	0,0016	0,0087	0,4375	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

IdCompon	SI3	SI4	SI5	SIV	SIREC	SIBUR	RECYCLE	BURNING
Comp1	0,00045	0,0003042		0,00285	0,064974		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp2	0,00027		0,0002625	0,0019		0,0167	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comp3	0,00153	0,00392	0,000795	0,0095	0,062475	0,012525	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Figura 318.** BBDD del modelo matemático social del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados (Elaboración propia)

Además, desde el software MPL se obtiene el valor de resultado óptimo y la alternativa escogida tal y como se puede apreciar en la siguiente figura (Figura 319):

```
MPL Modeling System - Copyright (c) 1988-2018, Maximal Software, Inc.
-----
MODEL STATISTICS
Problem name:      ReverseLogisticTreatmentModel1BBDDsoc2
Filename:         RLTMBBDDsoc2.mpl
Date:            September 2, 2020
Time:            18:49
Parsing time:     3.41 sec
MPL version:     5.0.8.116
Solver name:     CPLEX (11.2.1)
Objective value: 0.540299998596
MIP best bound:  0.446200000122
Integer nodes:   0
Improving nodes: 0
Iterations:     0
Solution time:   0.01 sec
Solver result:   Optimal integer solution found
Result code:    101
Constraints:    4
Variables:     11
Integers:      11
Nonzeros:      20
Density:       45 %

SOLUTION RESULT
Optimal integer solution found
MAX SocialImpact = 0.5403

DECISION VARIABLES
VARIABLE REF[i] :

Variable Name      Activity
-----
REFPro             1.0000
```

**Figura 319.** Archivo solución del programa MPL del modelo matemático social del ejemplo de aplicación Neumáticos Usados (Elaboración propia)

Como se puede apreciar, la alternativa más apropiada desde la perspectiva social es el recauchutado, ya que es la que precisa mayor dedicación por unidad para su tratamiento, y además es llevada a cabo en una provincia con una tasa de desempleo superior a la media nacional.

**15.3.2.4. Subproceso de solución**

A través del software MPL se ha obtenido una alternativa de solución óptima para cada FO (económica, ambiental y social). En la tabla siguiente, se indican las tres alternativas de solución determinadas. Las tres primeras columnas hacen referencia a las alternativas de tratamiento del producto en su conjunto (**OCA** – Reventa como neumático de ocasión, **GOM** – Reventa como neumático de gomilla, **REF** – Reacondicionamiento) y el resto de las columnas hacen referencia al tratamiento de los componentes del producto, una vez desensamblado (**REC** – Reciclaje, **BUR** - Incineración). De esta forma, las tres primeras alternativas hacen referencia a las alternativas de intervención sobre el producto y el resto de las alternativas hacen referencia a la combinación de tratamientos sobre los componentes. Además, se expone la solución en forma de vector, de manera que se asigna un “1” a la alternativa más adecuada de cada función objetivo.

En esta línea, para la función objetivo económica, se selecciona la alternativa de reacondicionamiento (**REF**) como la más adecuada. La función ambiental contempla como alternativa seleccionada a la reventa como neumático de ocasión (**OCA**). Por último, la función social también obtiene como mejor alternativa el reacondicionamiento (**REF**). Además, en la última columna de la tabla, se indica el valor óptimo de cada función objetivo:

FUNCIÓN OBJETIVO	ALTERNATIVA SELECCIONADA									VALOR ÓPTIMO
	OCA	GOM	REF	REC			BUR			
ECONÓMICA	0	0	1	0	0	0	0	0	0	14,7250
AMBIENTAL	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0004
SOCIAL	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,5402

**Tabla 74.** Alternativa seleccionada y valor óptimo para cada función objetivo (Elaboración propia).

Al tratarse de un problema multi-objetivo y al no coincidir las tres soluciones, la alternativa más adecuada será aquella que más se aproxime al punto ideal formado por los valores óptimos de las tres funciones objetivo, tal y como se ha explicado en capítulos anteriores.

En este caso, debido a las características analizadas, se contemplan cinco posibles soluciones de disposición, teniendo en cuenta que existen tres soluciones (**Soluciones 1 – 3**) que reintroducen el producto en el mercado (**OCA**, **GOM** y **REF**) y dos soluciones (**Soluciones 4 y 5**) que combinan las alternativas para el aprovechamiento de los componentes (**REC** y **BUR**).

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

	ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN								
	OCA	GOM	REF	REC			BUR		
Solución 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Solución 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Solución 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Solución 4	0	0	0	1	0	1	0	1	0
Solución 5	0	0	0	1	0	0	0	1	1

Tabla 75. Relación de posibles soluciones (Elaboración propia).

Para proceder a descubrir cuál es la solución más adecuada, se trabaja con el peso correspondiente a cada uno de los objetivos. En base a la política de sostenibilidad de la empresa, la ponderación de los factores de sostenibilidad es la siguiente:

- Factores económicos: 80%
- Factores ambientales: 15%
- Factores sociales: 5 %

Una vez determinado el peso específico de cada objetivo, se muestra el grado de aproximación al punto ideal de cada alternativa (DPIP):

	ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN									Wj Econom.	Wj Ambienta	Wj Social.	DPIP
	OCA	GOM	REF	REC			BUR			0,8	0,15	0,05	
Solución 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,32	-	0,04	0,36
Solución 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,67	5,93	0,04	6,64
Solución 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-	0,95	-	0,95
Solución 4	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0,79	0,29	0,03	1,10
Solución 5	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0,84	25,10	0,03	25,97

Tabla 76. Valores de DPIP para cada posible solución (Elaboración propia).

En base a los resultados mostrado en la tabla anterior, se puede apreciar como la alternativa más adecuada sería **la reintroducción en el mercado como neumático de ocasión (OCA – Solución 1), es decir reintroducir en el mercado el producto con grandes ingresos y pocos costes específicos (gran rentabilidad económica) y sin intervención específica (mínimo impacto ambiental)**, ya que ofrece un valor más bajo de aproximación al punto ideal (DPIP). Claro está que para que el neumático sea revendido directamente al mercado, como neumático de ocasión, debe encontrarse en buen estado, cumpliendo ciertas características que no todos cumplen, si no, no sería posible dicha alternativa. Por tanto, lo primero que queda claro es que: **si el neumático se encuentra en buen estado, habrá que tratar de reintroducirlo en el mercado vendiéndolo de nuevo como neumático de ocasión.**



No obstante, un neumático que tiene contemplada la opción de reacondicionamiento (porque hay que intervenir sobre él para dejarlo en buen estado) no debería contemplar la opción de reutilización o reintroducción en el mercado, como neumático de ocasión, directamente sin intervenir, por tanto, asumiendo que el neumático no se encuentra en perfecto estado, se anularía la primera posible solución. En este caso, el modelo indica como alternativa prioritaria reacondicionarlo para sacarlo de nuevo al mercado (**Solución 3 con DPIP = 0'95**).

Obviamente, si la ponderación de factores hubiese sido otra, la alternativa de disposición más adecuada se vería modificada. Por ejemplo, si perdiese peso el factor económico a favor del factor ambiental, la alternativa de aprovechamiento de componentes (**Solución 4**) llegaría a convertirse en la más adecuada, siempre después de la reutilización como neumático de ocasión, debido a que dicha alternativa contempla mucho menor impacto ambiental que el reacondicionamiento.

Para ilustrar cómo funciona el manual, en el siguiente apartado, se aplica el manual de usuario de la herramienta matemática a tres casos reales.

#### **15.4. Aplicación del manual de usuario a tres productos recuperados**

Se describen, a continuación, tres casos reales de la empresa de neumáticos usados en los que se ha aplicado el manual de usuario para la gestión de las recuperaciones. En cada caso, se desarrollan los pasos que componen el manual para obtener la alternativa de disposición más adecuada.

##### **15.4.1. Caso 1.**

- 1. Información que nos aporta el cliente sobre el neumático.** El neumático se encuentra en buen estado, por lo que puede ser catalogado como NUR.
- 2. Concretar las alternativas de disposición que no son viables para cada sillón en cuestión.** Puesto que el neumático se encuentra en buen estado, es catalogado como NUR, por lo que puede ser reutilizado/revendido como neumático de ocasión o de gomilla. Además, también se puede reacondicionar el neumático para poder sacarlo al mercado como neumático recauchutado. Asimismo, también son viables las alternativas de tratamiento de componentes (reciclaje e incineración).
- 3. Calcular los valores de cada dimensión de sostenibilidad:**

**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.**

Este tipo de neumático no tiene mucha demanda actualmente, por tanto, el precio de venta de ese tipo de neumático en el mercado está un poco más bajo que el valor de referencia, concretamente a 7'5 €. Dicho neumático se puede reacondicionar, pero su precio de venta también es un poco más bajo que el valor de referencia, concretamente a 20 €. Además, el neumático suele tardar más tiempo en venderse, cifrándose en 30 meses el tiempo de almacenamiento previo a la venta. El resto de los parámetros permanecen con los mismos valores de referencia.

**a. Valores fijos:**

INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Srec<sub>i,1</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 1 (acero) obtenido del producto i	0'2750
<b>Srec<sub>i,3</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 3 (caucho) obtenido del producto i	1'3520
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:		
<b>Sbur<sub>i,2</sub></b>	ingresos por incineración del componente 2 (fibra) obtenido de producto i	-
<b>Sbur<sub>i,3</sub></b>	ingresos por incineración del componente 3 (caucho) obtenido de producto i	0'1530
OTROS INGRESOS COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
<b>SUB<sub>i</sub></b>	ingresos obtenidos por subvención de gestión del producto i	0'3750
COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
<b>CIS<sub>i</sub></b>	coste de inspección y clasificación del producto i	0'1100
COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>COP<sub>i</sub></b>	coste de embalaje del producto i para reutilización o reventa	0'2500
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>CT<sub>3i,1</sub></b>	coste de transporte del componente 1 (acero) del producto i antes de ser desensamblado para reciclaje	0'0320
<b>CT<sub>3i,3</sub></b>	coste de transporte del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser desensamblado para reciclaje	0'1100
<b>CL<sub>i,1</sub></b>	coste de troceado del componente 1 (acero) del producto i antes de ser destinado para reciclaje o incineración ( <b>valorización Fase I</b> )	0'0680
<b>CL<sub>i,3</sub></b>	coste de troceado del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser destinado para reciclaje ( <b>valorización Fase I</b> )	0'2300
<b>CS<sub>2i,1</sub></b>	coste de granulado del componente 1 (acero) del producto i después de ser desensamblado para reciclaje ( <b>valorización Fase II</b> )	0'0780
<b>CS<sub>2i,3</sub></b>	coste de granulado del componente 3 (caucho) del producto i después de ser desensamblado para reciclaje ( <b>valorización Fase II</b> )	0'2650

**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.**

<b>CT<sub>4i,1</sub></b>	coste de transporte específico de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i	0'0310
<b>CT<sub>4i,3</sub></b>	coste de transporte específico de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i	0'3920
<b>Costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:</b>		
<b>CT<sub>3i,2</sub></b>	coste de transporte del componente 2 (fibra) del producto i antes de ser desensamblado para incineración	0'0190
<b>CT<sub>3i,3</sub></b>	coste de transporte del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser desensamblado para incineración	0'1100
<b>CL<sub>i,2</sub></b>	coste de troceado del componente 2 (fibra) del producto i antes de ser destinado para incineración ( <b>valorización Fase I</b> )	0'0410
<b>CL<sub>i,3</sub></b>	coste de troceado del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser destinado para incineración ( <b>valorización Fase I</b> )	0'2300
<b>CS<sub>2i,2</sub></b>	coste de granulado del componente 2 (fibra) del producto i después de ser desensamblado para incineración ( <b>valorización Fase II</b> )	0'0470
<b>CS<sub>2i,3</sub></b>	coste de granulado del componente 3 (caucho) del producto i después de ser desensamblado para incineración ( <b>valorización Fase II</b> )	0'2650
<b>CT<sub>5i,2</sub></b>	coste de transporte específico de incineración del componente 2 (fibra) del producto i	0'0280
<b>CT<sub>5i,3</sub></b>	coste de transporte específico de incineración del componente 3 (caucho) del producto i	0'0850
<b>Costes específicos de cada alternativa de disposición</b>		
<b>Crec<sub>i,1</sub></b>	coste de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i	0'0010
<b>Crec<sub>i,3</sub></b>	coste de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i	0'0010
<b>Cbur<sub>i,j</sub></b>	coste de incineración del componente j del producto i	-
<b>Crmi<sub>i,j</sub></b>	coste de gestión de los residuos del componente j del producto i	-
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>EIT<sub>3i1</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 1(acero) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	0'0001
<b>EIT<sub>3i33</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3(caucho) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	0'0003
<b>EIP<sub>2i,1</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 1 (acero) del producto i	0'0000
<b>EIP<sub>2i,3</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 3 (caucho) del producto i	0'0000
<b>EIT<sub>4i,1</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 1 (acero) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje	0'0001
<b>EIT<sub>4i,3</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje	0'0009
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto:		

**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.**

<b>EIT<sub>3i2</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 2(fibra) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	0'0000
<b>EIT<sub>3i33</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3(caucho) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	0'0003
<b>EIP<sub>2i,2</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 2 (fibra) del producto i	0'0000
<b>EIP<sub>2i,3</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 3 (caucho) del producto i	0'0000
<b>EIT<sub>5i,2</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 2 (fibra) del producto i la planta de valorización hasta el centro eliminación por incineración	0'0001
<b>EIT<sub>5i,3</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3 (caucho) del producto i la planta de valorización hasta el centro eliminación por incineración	0'0003
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
<b>EIR<sub>i,1</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i	0'0001
<b>EIR<sub>i,3</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i	0'0001
<b>EII<sub>i,2</sub></b>	impacto ambiental de incineración del componente 2 (fibra) del producto i	- 0'0006
<b>EII<sub>i,3</sub></b>	impacto ambiental de incineración del componente 3 (caucho) del producto i	0'0655
<b>Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:</b>		
<b>W<sub>3i</sub>*μ<sub>3i</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del producto i a la planta de valorización * factor regional correspondiente	0'0023
<b>W<sub>vi1</sub>*μ<sub>vi1</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 1 (acero) del producto i * factor regional correspondiente	0'0029
<b>W<sub>vi3</sub>*μ<sub>vi3</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	0'0095
<b>W<sub>4i1</sub>*μ<sub>4i1</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 1 (acero) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje * factor regional correspondiente	0'0003
<b>W<sub>4i3</sub>*μ<sub>4i3</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje * factor regional correspondiente	0'0039
<b>Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto:</b>		
<b>W<sub>3i</sub>*μ<sub>3i</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del producto i a la planta de valorización * factor regional correspondiente	0'0023
<b>W<sub>vi2</sub>*μ<sub>vi2</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 2 (fibra) del producto i * factor regional correspondiente	0'0019
<b>W<sub>vi3</sub>*μ<sub>vi3</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	0'0095
<b>W<sub>5i2</sub>*μ<sub>5i2</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 2 (fibra) del producto i desde la planta de valorización hasta la planta de incineración * factor regional correspondiente	0'0003
<b>W<sub>5i3</sub>*μ<sub>5i3</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta la planta de incineración * factor regional correspondiente	0'0008
<b>PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
<b>W<sub>rec1</sub>*μ<sub>rec1</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 1 (acero) del producto i * factor regional correspondiente	0'0650
<b>W<sub>rec3</sub>*μ<sub>rec3</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	0'0625

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

$W_{bur_{i2}} * \mu_{bur_{i2}}$	Horas de MO de las operaciones de Incineración del componente 2 (fibra) del producto i * factor regional correspondiente	0'0167
$W_{bur_{i3}} * \mu_{bur_{i3}}$	Horas de MO de las operaciones de Incineración del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	0'0125

**Tabla 77.** Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores fijos para el caso 1 de neumáticos usados (Elaboración propia).

**b. Valores variables:**

<b>INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>Soc<sub>ai</sub></b>	ingresos por reutilización del producto i como neumático de ocasión	<b>7'5000</b>
<b>Sgom<sub>i</sub></b>	ingresos por reutilización del producto i neumático de gomilla	4'0000
<b>Sref<sub>i</sub></b>	ingresos por reacondicionamiento del producto i	<b>20'0000</b>
<b>COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>CT<sub>ii</sub></b>	coste de transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	0'3980
<b>COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>CS<sub>ii</sub></b>	coste de almacenaje del producto i antes de la reutilización o reventa	<b>6'0000</b>
<b>Costes específicos de cada alternativa de disposición</b>		
<b>Coca<sub>i</sub></b>	costes por reutilización del producto i como neumático de ocasión	<b>1'1250</b>
<b>Cgom<sub>i</sub></b>	costes por reutilización del producto i neumático de gomilla	0'7940
<b>Cref<sub>i</sub></b>	coste de reacondicionamiento del producto i	14'4920
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>EIT<sub>ii</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	0'0001
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>EIT<sub>2Ai</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de ocasión	<b>0'0009</b>
<b>EIT<sub>2Bi</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de gomilla (mercado secundario)	0'0158
<b>EIT<sub>2Ci</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de carcasa (recauchutado)	0'0016
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

EIP <sub>ii</sub>	impacto ambiental de reacondicionamiento del producto i	0'0012
<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
W <sub>1i</sub> *μ <sub>1i</sub>	Horas de MO de las operaciones de recogida, categorización, almacén y venta del producto i * factor regional correspondiente	0'0941
<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
W <sub>2Ai</sub> *μ <sub>2Ai</sub>	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo ocasión* factor regional correspondiente	0'0139
W <sub>2Bi</sub> *μ <sub>2Bi</sub>	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo gomilla * factor regional correspondiente	0'0016
W <sub>2Ci</sub> *μ <sub>2Ci</sub>	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo carcasa * factor regional correspondiente	0'0087
<b>PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
W <sub>refi</sub> *μ <sub>refi</sub>	Horas de MO de las operaciones de Reacondicionamiento del producto i * factor regional correspondiente	0'4375

**Tabla 78.** Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores variables para el caso 1 de neumáticos usados (Elaboración propia).

**4. Obtener la alternativa de disposición más adecuada mediante la ejecución del subproceso de solución.**

	ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN									Wj Econom.	Wj Ambiental	Wj Social.	DPIP
	OCA	GOM	REF	REC			BUR			0,8	0,15	0,05	
Solución 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,84	-	0,04	0,88
Solución 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	17,63	2,20	0,04	19,88
Solución 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	5,44	0,27	-	5,71
Solución 4	0	0	0	1	0	1	0	1	0	-	0,03	0,03	0,06
Solución 5	0	0	0	1	0	0	0	1	1	4,72	9,63	0,03	14,38

**Tabla 79.** Valores de DPIP para cada posible solución del caso 1 de neumáticos usados (Elaboración propia).

En la tabla de valores de DPIP, se aprecia como la alternativa de disposición más adecuada es el reciclaje del componente 1 (acero) y del componente 3 (caucho) e incineración del componente 2 (fibra), correspondiente a la Solución 4, por tener el valor más bajo. En este caso, la alternativa de reacondicionamiento (solución 3) se queda muy cerca de ser la alternativa más adecuada.

**15.4.2. Caso 2.**

**1. Información que nos aporta el cliente sobre el neumático.** El neumático se encuentra en buen estado, por lo que puede ser catalogado como NUR.

**2. Concretar las alternativas de disposición que no son viables para cada sillón en cuestión.** Puesto que el neumático se encuentra en buen estado, es catalogado como NUR, por lo que puede ser reutilizado/revendido como neumático de ocasión o de gomilla. Además, también se puede reacondicionar el neumático para poder sacarlo al mercado como neumático recauchutado. Asimismo, también son viables las alternativas de tratamiento de componentes (reciclaje e incineración).

**3. Calcular los valores de cada dimensión de sostenibilidad:**

Este tipo de neumático no tiene mucha demanda actualmente, por tanto, el tiempo de permanencia en la planta es mayor que el valor de referencia, siendo en este caso de 5 meses. Además, el cliente al que se le puede vender el neumático como ocasión se encuentra a 600 kilómetros.

**a. Valores fijos:**

INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Srec<sub>i,1</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 1 (acero) obtenido del producto i	0'2750
<b>Srec<sub>i,3</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 3 (caucho) obtenido del producto i	1'3520
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:		
<b>Sbur<sub>i,2</sub></b>	ingresos por incineración del componente 2 (fibra) obtenido de producto i	-
<b>Sbur<sub>i,3</sub></b>	ingresos por incineración del componente 3 (caucho) obtenido de producto i	0'1530
OTROS INGRESOS COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
<b>SUB<sub>i</sub></b>	ingresos obtenidos por subvención de gestión del producto i	0'3750
COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
<b>CIS<sub>i</sub></b>	coste de inspección y clasificación del producto i	0'1100
COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>COP<sub>i</sub></b>	coste de embalaje del producto i para reutilización o reventa	0'2500
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>CT<sub>3i,1</sub></b>	coste de transporte del componente 1 (acero) del producto i antes de ser desensamblado para reciclaje	0'0320
<b>CT<sub>3i,3</sub></b>	coste de transporte del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser desensamblado para reciclaje	0'1100

**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.**

<b>CL<sub>i,1</sub></b>	coste de troceado del componente 1 (acero) del producto i antes de ser destinado para reciclaje o incineración ( <b>valorización Fase I</b> )	0'0680
<b>CL<sub>i,3</sub></b>	coste de troceado del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser destinado para reciclaje ( <b>valorización Fase I</b> )	0'2300
<b>CS<sub>2i,1</sub></b>	coste de granulado del componente 1 (acero) del producto i después de ser desensamblado para reciclaje ( <b>valorización Fase II</b> )	0'0780
<b>CS<sub>2i,3</sub></b>	coste de granulado del componente 3 (caucho) del producto i después de ser desensamblado para reciclaje ( <b>valorización Fase II</b> )	0'2650
<b>CT<sub>4i,1</sub></b>	coste de transporte específico de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i	0'0310
<b>CT<sub>4i,3</sub></b>	coste de transporte específico de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i	0'3920
<b>Costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:</b>		
<b>CT<sub>3i,2</sub></b>	coste de transporte del componente 2 (fibra) del producto i antes de ser desensamblado para incineración	0'0190
<b>CT<sub>3i,3</sub></b>	coste de transporte del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser desensamblado para incineración	0'1100
<b>CL<sub>i,2</sub></b>	coste de troceado del componente 2 (fibra) del producto i antes de ser destinado para incineración ( <b>valorización Fase I</b> )	0'0410
<b>CL<sub>i,3</sub></b>	coste de troceado del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser destinado para incineración ( <b>valorización Fase I</b> )	0'2300
<b>CS<sub>2i,2</sub></b>	coste de granulado del componente 2 (fibra) del producto i después de ser desensamblado para incineración ( <b>valorización Fase II</b> )	0'0470
<b>CS<sub>2i,3</sub></b>	coste de granulado del componente 3 (caucho) del producto i después de ser desensamblado para incineración ( <b>valorización Fase II</b> )	0'2650
<b>CT<sub>5i,2</sub></b>	coste de transporte específico de incineración del componente 2 (fibra) del producto i	0'0280
<b>CT<sub>5i,3</sub></b>	coste de transporte específico de incineración del componente 3 (caucho) del producto i	0'0850
<b>Costes específicos de cada alternativa de disposición</b>		
<b>Crec<sub>i,1</sub></b>	coste de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i	0'0010
<b>Crec<sub>i,3</sub></b>	coste de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i	0'0010
<b>Cbur<sub>i,j</sub></b>	coste de incineración del componente j del producto i	-
<b>Crm<sub>i,j</sub></b>	coste de gestión de los residuos del componente j del producto i	-
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
<b>Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:</b>		
<b>EIT<sub>3i1</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 1(acero) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	0'0001
<b>EIT<sub>3i3</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3(caucho) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	0'0003
<b>EIP<sub>2i,1</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 1 (acero) del producto i	0'0000
<b>EIP<sub>2i,3</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 3 (caucho) del producto i	0'0000



**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.**

<b>EIT<sub>4i,1</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 1 (acero) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje	0'0001
<b>EIT<sub>4i,3</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje	0'0009
<b>Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto:</b>		
<b>EIT<sub>3i2</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 2(fibra) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	0'0000
<b>EIT<sub>3i33</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3(caucho) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	0'0003
<b>EIP<sub>2i,2</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 2 (fibra) del producto i	0'0000
<b>EIP<sub>2i,3</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 3 (caucho) del producto i	0'0000
<b>EIT<sub>5i,2</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 2 (fibra) del producto i la planta de valorización hasta el centro eliminación por incineración	0'0001
<b>EIT<sub>5i,3</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3 (caucho) del producto i la planta de valorización hasta el centro eliminación por incineración	0'0003
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
<b>EIR<sub>i,1</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i	0'0001
<b>EIR<sub>i,3</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i	0'0001
<b>EII<sub>i,2</sub></b>	impacto ambiental de incineración del componente 2 (fibra) del producto i	- 0'0006
<b>EII<sub>i,3</sub></b>	impacto ambiental de incineración del componente 3 (caucho) del producto i	0'0655
<b>Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:</b>		
<b>W<sub>3i</sub>*μ<sub>3i</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del producto i a la planta de valorización * factor regional correspondiente	0'0023
<b>W<sub>vi1</sub>*μ<sub>vi1</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 1 (acero) del producto i * factor regional correspondiente	0'0029
<b>W<sub>vi3</sub>*μ<sub>vi3</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	0'0095
<b>W<sub>4i1</sub>*μ<sub>4i1</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 1 (acero) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje * factor regional correspondiente	0'0003
<b>W<sub>4i3</sub>*μ<sub>4i3</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje * factor regional correspondiente	0'0039
<b>Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto:</b>		
<b>W<sub>3i</sub>*μ<sub>3i</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del producto i a la planta de valorización * factor regional correspondiente	0'0023
<b>W<sub>vi2</sub>*μ<sub>vi2</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 2 (fibra) del producto i * factor regional correspondiente	0'0019
<b>W<sub>vi3</sub>*μ<sub>vi3</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	0'0095
<b>W<sub>5i2</sub>*μ<sub>5i2</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 2 (fibra) del producto i desde la planta de valorización hasta la planta de incineración * factor regional correspondiente	0'0003
<b>W<sub>5i3</sub>*μ<sub>5i3</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta la planta de incineración * factor regional correspondiente	0'0008

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN		
$W_{rec_{i1}} * \mu_{rec_{i1}}$	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 1 (acero) del producto i * factor regional correspondiente	0'0650
$W_{rec_{i3}} * \mu_{rec_{i3}}$	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	0'0625
$W_{bur_{i2}} * \mu_{bur_{i2}}$	Horas de MO de las operaciones de Incineración del componente 2 (fibra) del producto i * factor regional correspondiente	0'0167
$W_{bur_{i3}} * \mu_{bur_{i3}}$	Horas de MO de las operaciones de Incineración del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	0'0125

Tabla 80. Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores fijos para el caso 2 de neumáticos usados (Elaboración propia).

b. Valores variables:

INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$S_{oca_i}$	ingresos por reutilización del producto i como neumático de ocasión	10'0000
$S_{gom_i}$	ingresos por reutilización del producto i neumático de gomilla	4'0000
$S_{ref_i}$	ingresos por reacondicionamiento del producto i	30'0000
COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
$CT_{ii}$	coste de transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	0'3980
COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$CS_{ii}$	coste de almacenaje del producto i antes de la reutilización o reventa	1'0000
Costes específicos de cada alternativa de disposición		
$C_{oca_i}$	costes por reutilización del producto i como neumático de ocasión	2'2500
$C_{gom_i}$	costes por reutilización del producto i neumático de gomilla	0'7940
$C_{ref_i}$	coste de reacondicionamiento del producto i	14'4920
PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS		
$EIT_{ii}$	impacto ambiental del transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	0'0001
PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$EIT_{2Ai}$	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de ocasión	0'0019
$EIT_{2Bi}$	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de gomilla (mercado secundario)	0'0158

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

$EIT_{2Ci}$	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de carcasa (recauchutado)	0'0016
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
$EIP_{ii}$	impacto ambiental de reacondicionamiento del producto i	0'0012
<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
$W_{ii} * \mu_{ii}$	Horas de MO de las operaciones de recogida, categorización, almacén y venta del producto i * factor regional correspondiente	0'0941
<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$W_{2Ai} * \mu_{2Ai}$	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo ocasión* factor regional correspondiente	0'0281
$W_{2Bi} * \mu_{2Bi}$	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo gomilla * factor regional correspondiente	0'0016
$W_{2Ci} * \mu_{2Ci}$	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo carcasa * factor regional correspondiente	0'0087
<b>PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
$W_{refi} * \mu_{refi}$	Horas de MO de las operaciones de Reacondicionamiento del producto i * factor regional correspondiente	0'4375

**Tabla 81.** Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores variables para el caso 2 de neumáticos usados (Elaboración propia).

**4. Obtener la alternativa de disposición más adecuada mediante la ejecución del subproceso de solución.**

	ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN									Wj Econom.	Wj Ambiental	Wj Social.	DPIP
	OCA	GOM	REF	REC			BUR			0,8	0,15	0,05	
Solución 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,44	0,09	0,04	0,57
Solución 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,70	1,80	0,04	2,54
Solución 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	-	0,20	-	0,20
Solución 4	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0,79	-	0,03	0,82
Solución 5	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0,84	7,96	0,03	8,84

**Tabla 82.** Valores de DPIP para cada posible solución del caso 2 de neumáticos usados (Elaboración propia).

En este caso, la alternativa de reacondicionamiento (solución 3) contiene en valor más bajo de DPIP, por tanto, es la alternativa más adecuada.

**15.4.3. Caso 3.**

**1. Información que nos aporta el cliente sobre el neumático.** El neumático no se encuentra en buen estado, por lo que es catalogado como NFVU. En este caso, el neumático debe ser valorizado para aprovechar sus componentes

2. **Concretar las alternativas de disposición que no son viables para cada sillón en cuestión.** Puesto que el neumático no se encuentra en buen estado, siendo catalogado como NFVU, no puede ser reutilizado/revendido como neumático de ocasión o de gomilla ni reacondicionado. Consecuentemente, sólo son viables las alternativas de tratamiento de componentes (reciclaje e incineración).

3. **Calcular los valores de cada dimensión de sostenibilidad:**

Este tipo de neumático se remite directamente a la planta de valorización para que se aprovechen los componentes.

a. **Valores fijos:**

<b>INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Srec<sub>i,1</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 1 (acero) obtenido del producto i	0'2750
<b>Srec<sub>i,3</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 3 (caucho) obtenido del producto i	1'3520
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:		
<b>Sbur<sub>i,2</sub></b>	ingresos por incineración del componente 2 (fibra) obtenido de producto i	-
<b>Sbur<sub>i,3</sub></b>	ingresos por incineración del componente 3 (caucho) obtenido de producto i	0'1530
<b>INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		
<b>Srec<sub>i,1</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 1 (acero) obtenido del producto i	0'2750
<b>Srec<sub>i,3</sub></b>	ingresos por reciclaje del componente 3 (caucho) obtenido del producto i	1'3520
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:		
<b>Sbur<sub>i,2</sub></b>	ingresos por incineración del componente 2 (fibra) obtenido de producto i	-
<b>Sbur<sub>i,3</sub></b>	ingresos por incineración del componente 3 (caucho) obtenido de producto i	0'1530
<b>OTROS INGRESOS COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>SUB<sub>i</sub></b>	ingresos obtenidos por subvención de gestión del producto i	0'3750
<b>COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>CIS<sub>i</sub></b>	coste de inspección y clasificación del producto i	0'1100
<b>COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

<b>COP<sub>i</sub></b>	coste de embalaje del producto i para reutilización o reventa	0'2500
<b>Costes comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:</b>		
<b>CT<sub>3i,1</sub></b>	coste de transporte del componente 1 (acero) del producto i antes de ser desensamblado para reciclaje	0'0320
<b>CT<sub>3i,3</sub></b>	coste de transporte del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser desensamblado para reciclaje	0'1100
<b>CL<sub>i,1</sub></b>	coste de troceado del componente 1 (acero) del producto i antes de ser destinado para reciclaje o incineración ( <b>valorización Fase I</b> )	0'0680
<b>CL<sub>i,3</sub></b>	coste de troceado del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser destinado para reciclaje ( <b>valorización Fase I</b> )	0'2300
<b>CS<sub>2i,1</sub></b>	coste de granulado del componente 1 (acero) del producto i después de ser desensamblado para reciclaje ( <b>valorización Fase II</b> )	0'0780
<b>CS<sub>2i,3</sub></b>	coste de granulado del componente 3 (caucho) del producto i después de ser desensamblado para reciclaje ( <b>valorización Fase II</b> )	0'2650
<b>CT<sub>4i,1</sub></b>	coste de transporte específico de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i	0'0310
<b>CT<sub>4i,3</sub></b>	coste de transporte específico de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i	0'3920
<b>Costes comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación sin recuperación de valor:</b>		
<b>CT<sub>3i,2</sub></b>	coste de transporte del componente 2 (fibra) del producto i antes de ser desensamblado para incineración	0'0190
<b>CT<sub>3i,3</sub></b>	coste de transporte del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser desensamblado para incineración	0'1100
<b>CL<sub>i,2</sub></b>	coste de troceado del componente 2 (fibra) del producto i antes de ser destinado para incineración ( <b>valorización Fase I</b> )	0'0410
<b>CL<sub>i,3</sub></b>	coste de troceado del componente 3 (caucho) del producto i antes de ser destinado para incineración ( <b>valorización Fase I</b> )	0'2300
<b>CS<sub>2i,2</sub></b>	coste de granulado del componente 2 (fibra) del producto i después de ser desensamblado para incineración ( <b>valorización Fase II</b> )	0'0470
<b>CS<sub>2i,3</sub></b>	coste de granulado del componente 3 (caucho) del producto i después de ser desensamblado para incineración ( <b>valorización Fase II</b> )	0'2650
<b>CT<sub>5i,2</sub></b>	coste de transporte específico de incineración del componente 2 (fibra) del producto i	0'0280
<b>CT<sub>5i,3</sub></b>	coste de transporte específico de incineración del componente 3 (caucho) del producto i	0'0850
<b>Costes específicos de cada alternativa de disposición</b>		
<b>Crec<sub>i,1</sub></b>	coste de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i	0'0010
<b>Crec<sub>i,3</sub></b>	coste de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i	0'0010
<b>Cbur<sub>i,j</sub></b>	coste de incineración del componente j del producto i	-
<b>Crm<sub>i,j</sub></b>	coste de gestión de los residuos del componente j del producto i	-
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:		

**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.**

<b>EIT<sub>3i1</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 1(acero) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	0'0001
<b>EIT<sub>3i33</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3(caucho) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	0'0003
<b>EIP<sub>2i,1</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 1 (acero) del producto i	0'0000
<b>EIP<sub>2i,3</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 3 (caucho) del producto i	0'0000
<b>EIT<sub>4i,1</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 1 (acero) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje	0'0001
<b>EIT<sub>4i,3</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje	0'0009
<b>Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto:</b>		
<b>EIT<sub>3i2</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 2(fibra) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	0'0000
<b>EIT<sub>3i33</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3(caucho) del producto i desde el centro de decisión (planta de recogida) hasta la localización de la intervención (planta de valorización)	0'0003
<b>EIP<sub>2i,2</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 2 (fibra) del producto i	0'0000
<b>EIP<sub>2i,3</sub></b>	impacto ambiental de la valorización del componente 3 (caucho) del producto i	0'0000
<b>EIT<sub>5i,2</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 2 (fibra) del producto i la planta de valorización hasta el centro eliminación por incineración	0'0001
<b>EIT<sub>5i,3</sub></b>	impacto ambiental del transporte del componente 3 (caucho) del producto i la planta de valorización hasta el centro eliminación por incineración	0'0003
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
<b>EIR<sub>i,1</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 1 (acero) del producto i	0'0001
<b>EIR<sub>i,3</sub></b>	impacto ambiental de reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i	0'0001
<b>EII<sub>i,2</sub></b>	impacto ambiental de incineración del componente 2 (fibra) del producto i	- 0'0006
<b>EII<sub>i,3</sub></b>	impacto ambiental de incineración del componente 3 (caucho) del producto i	0'0655
<b>Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de aprovechamiento de componentes:</b>		
<b>W<sub>3i</sub>*μ<sub>3i</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del producto i a la planta de valorización * factor regional correspondiente	0'0023
<b>W<sub>vi1</sub>*μ<sub>vi1</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 1 (acero) del producto i * factor regional correspondiente	0'0029
<b>W<sub>vi3</sub>*μ<sub>vi3</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	0'0095
<b>W<sub>4i1</sub>*μ<sub>4i1</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 1 (acero) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje * factor regional correspondiente	0'0003
<b>W<sub>4i3</sub>*μ<sub>4i3</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta el centro de reciclaje * factor regional correspondiente	0'0039
<b>Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de eliminación del producto:</b>		

**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.**

$W_{3i} * \mu_{3i}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del producto i a la planta de valorización * factor regional correspondiente	0'0023
$W_{vi2} * \mu_{vi2}$	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 2 (fibra) del producto i * factor regional correspondiente	0'0019
$W_{vi3} * \mu_{vi3}$	Horas de MO de las operaciones de valorización del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	0'0095
$W_{5i2} * \mu_{5i2}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 2 (fibra) del producto i desde la planta de valorización hasta la planta de incineración * factor regional correspondiente	0'0003
$W_{5i3} * \mu_{5i3}$	Horas de MO de las operaciones de transporte del componente 3 (caucho) del producto i desde la planta de valorización hasta la planta de incineración * factor regional correspondiente	0'0008
<b>PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
$W_{reci1} * \mu_{reci1}$	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 1 (acero) del producto i * factor regional correspondiente	0'0650
$W_{reci3} * \mu_{reci3}$	Horas de MO de las operaciones de Reciclaje del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	0'0625
$W_{bur12} * \mu_{bur12}$	Horas de MO de las operaciones de Incineración del componente 2 (fibra) del producto i * factor regional correspondiente	0'0167
$W_{bur13} * \mu_{bur13}$	Horas de MO de las operaciones de Incineración del componente 3 (caucho) del producto i * factor regional correspondiente	0'0125

**Tabla 83.** Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores fijos para el caso 3 de neumáticos usados (Elaboración propia).

**b. Valores variables:**

<b>INGRESOS COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Ingresos comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$S_{oca_i}$	ingresos por reutilización del producto i como neumático de ocasión	-
$S_{gom_i}$	ingresos por reutilización del producto i neumático de gomilla	-
$S_{ref_i}$	ingresos por reacondicionamiento del producto i	-
<b>COSTES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
$CT_{ii}$	coste de transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	0'3980
<b>COSTES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Costes comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
$CS_{ii}$	coste de almacenaje del producto i antes de la reutilización o reventa	-
<b>Costes específicos de cada alternativa de disposición</b>		
$C_{oca_i}$	costes por reutilización del producto i como neumático de ocasión	-
$C_{gom_i}$	costes por reutilización del producto i neumático de gomilla	-
$C_{ref_i}$	coste de reacondicionamiento del producto i	-
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		

PARTE V. APLICACIÓN.

Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

<b>EIT<sub>1i</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde el cliente hasta la empresa	0'0001
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros ambientales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>EIT<sub>2Ai</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de ocasión	-
<b>EIT<sub>2Bi</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de gomilla (mercado secundario)	-
<b>EIT<sub>2Ci</sub></b>	impacto ambiental del transporte del producto i desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de carcasa (recauchutado)	-
<b>PARÁMETROS AMBIENTALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
<b>EIP<sub>1i</sub></b>	impacto ambiental de reacondicionamiento del producto i	-
<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES A TODAS LAS ALTERNATIVAS</b>		
<b>W<sub>1i</sub>*μ<sub>1i</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de recogida, categorización, almacén y venta del producto i * factor regional correspondiente	0'0941
<b>PARÁMETROS SOCIALES COMUNES SEGÚN FINALIDAD</b>		
Parámetros sociales comunes a las alternativas con la finalidad de reintroducción en el mercado:		
<b>W<sub>2Ai</sub>*μ<sub>2Ai</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo ocasión* factor regional correspondiente	-
<b>W<sub>2Bi</sub>*μ<sub>2Bi</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo gomilla * factor regional correspondiente	-
<b>W<sub>2Ci</sub>*μ<sub>2Ci</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto i en el mercado tipo carcasa * factor regional correspondiente	-
<b>PARÁMETROS SOCIALES ESPECÍFICOS DE CADA ALTERNATIVA DE DISPOSICIÓN</b>		
<b>W<sub>refi</sub>*μ<sub>refi</sub></b>	Horas de MO de las operaciones de Reacondicionamiento del producto i * factor regional correspondiente	-

Tabla 84. Parámetros económicos, ambientales y sociales con valores variables para el caso 3 de neumáticos usados (Elaboración propia).

**4. Obtener la alternativa de disposición más adecuada mediante la ejecución del subproceso de solución.**

	ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN									Wj Econom.	Wj Ambiental	Wj Social.	DPIP
	OCA	GOM	REF	REC			BUR			0,8	0,15	0,05	
Solución 1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2,83	-	0,03	2,86
Solución 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2,83	-	0,03	2,86
Solución 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2,83	2,15	0,03	5,01
Solución 4	0	0	0	1	0	1	0	1	0	-	2,11	-	2,11
Solución 5	0	0	0	1	0	0	0	1	1	4,72	122,00	0,01	126,73

Tabla 85. Valores de DPIP para cada posible solución del caso 3 de neumáticos usados (Elaboración propia).



En este caso, las alternativas de reintroducción del producto en el mercado quedarían descartadas. No obstante, en la tabla de valores de DPIP, se aprecia como la alternativa de disposición más adecuada es el reciclaje del componente 1 (acero) y del componente 3 (caucho) e incineración del componente 2 (fibra), correspondiente a la Solución 4, por tener el valor más bajo.

## 15.5. Resultados

A continuación, se van a examinar los resultados anteriores en dos análisis diferentes. En primer lugar, se realiza un análisis de los resultados de los tres ejemplos realizados, comparando la solución de cada caso y analizando el resultado de la herramienta respecto a la política actual fija de la empresa. En segundo lugar, se realiza un análisis de sensibilidad de la herramienta, demostrando cómo cambia la alternativa de disposición escogida según la variación de valores de los parámetros.

### 15.5.1. Análisis de resultados

En cada uno de los tres ejemplos del apartado anterior, se ha aplicado la herramienta para obtener la alternativa de disposición más adecuada. Como se ha podido comprobar, en función de la información que aporta el cliente para cada situación y de la información que maneja la empresa respecto a las operaciones relacionadas con el producto, se obtienen los valores correspondientes a los parámetros de la herramienta y, con ellos, se ejecuta el subproceso de solución para obtener la alternativa de solución. El resumen de los resultados obtenidos para los casos anteriores se expone a continuación:

	DPIP Caso 1	DPIP Caso 2	DPIP Caso 3
Solución 1	0,88	0,57	2,86
Solución 2	19,88	2,54	2,86
Solución 3	5,71	0,20	5,01
Solución 4	0,06	0,82	2,11
Solución 5	14,38	8,84	126,73

**Tabla 86.** Valores de DPIP para cada posible solución de los casos de neumáticos usados (Elaboración propia).

Obviamente, los resultados de los tres casos demuestran cómo la herramienta varía en la elección de la alternativa más adecuada, en función de los valores de cada caso. En el caso 1, no existe lugar a dudas de que el aprovechamiento de los componentes, mediante

## PARTE V. APLICACIÓN.

### Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

el reciclaje de los componentes 1 y 3 y la incineración del componente 2 (solución 4), es la alternativa más adecuada, debido a las circunstancias tan adversas sobre las alternativas de reintroducción del producto. En cambio, en el caso 2, se observa que el reacondicionamiento en la alternativa más adecuada (solución 3), aunque con escaso margen de diferencia con respecto a la alternativa de reventa como neumático de ocasión. Asimismo, en el caso 3, la inviabilidad de aplicar las alternativas de reintroducción en el mercado (soluciones 1 – 3), hacen que la alternativa más adecuada sea sobre el tratamiento de componentes (soluciones 4 o 5). Entre estas dos soluciones, la diferencia entre incinerar o reciclar el caucho, muestra claramente como es mucho más sostenible reciclarlo que incinerarlo.

La política de decisión fija actual de la empresa (apartado 15.1), establece preferentemente la reutilización para venderlos como neumático de gomilla o de ocasión, según la demanda en cada momento, si el producto se encuentra en perfecto estado. En caso de no estar en perfecto estado, la empresa establece el aprovechamiento de los componentes a través de la venta del acero para ser reciclado, la fibra para ser incinerada y el caucho para ser reciclado o incinerado, según la demanda y el precio final.

Tomando como referencia dicha política actual, la empresa escogería la reutilización como neumático de ocasión o gomilla en el primer caso y segundo caso y el aprovechamiento de los componentes en el tercer caso. Comparando las soluciones para cada caso según la política actual de la empresa y el resultado de la herramienta matemática (Tabla 51), se puede apreciar como la herramienta coincide en la selección de la alternativa de solución más sostenible para el caso 3. En cambio, para los casos 1 y 2, la herramienta de solución determina alternativas diferentes a las que elegiría la empresa según la política actual.

	Política Fija Actual		Herramienta de solución	
	Alternativa Escogida	Valor DPIP	Alternativa Escogida	Valor DPIP
<b>Caso 1</b>	Venta como Ocasión o Gomilla (Solución 1 o 2)	0,88	Aprovechamiento componentes (Solución 4)	0,06
<b>Caso 2</b>	Venta como Ocasión o Gomilla (Solución 1 o 2)	0,57	Reacondicionamiento (Solución 3)	0,2
<b>Caso 3</b>	Aprovechamiento componentes (Solución 4)	2,11	Aprovechamiento componentes (Solución 4)	2,11

**Tabla 87.** Alternativas de solución determinadas según la política fija previa y la herramienta de solución para los tres casos de neumáticos usados (Elaboración propia).

Como se puede apreciar en la tabla anterior (Tabla 87), la herramienta de solución diseñada escoge la alternativa con menor DPIP en cada caso, asegurando que la disposición sea la más sostenible. De este modo, facilita el cambio de modelo de negocio actual hacia modelos más sostenibles.

### 15.5.2. Análisis de sensibilidad

Los resultados obtenidos con la herramienta matemática diseñada demuestran que la elección de la alternativa más adecuada depende los valores de los parámetros en cada situación concreta, debido a que pequeñas variaciones en los valores pueden causar cambios en la alternativa prioritaria. Por tanto, será determinante llevar en todo momento el control sobre el valor de los parámetros y su evolución, debiéndose gestionar adecuadamente por parte de los decisores.

Dado que existe una gran interdependencia entre los valores utilizados y la decisión sobre la alternativa de disposición más sostenible, podría ser interesante conocer el rango de valores para cada parámetro clave que justificaría cada decisión. Por ejemplo, si la **distancia a la que se encuentra el cliente del neumático de ocasión** es muy grande, seguramente será más interesante reacondicionar el neumático para venderlo como recauchutado. En cambio, si la distancia a la que se encuentra el cliente es baja, o incluso nula porque acude a las instalaciones a comprar el neumático, resultará más interesante venderlo como neumático de ocasión que como reacondicionado.

La distancia a la que se encuentra el cliente del neumático de ocasión influye directamente sobre el valor de los siguientes parámetros:

- **Coca<sub>i</sub>**, costes por reutilización del producto  $i$  como neumático de ocasión.
- **EIT<sub>2Ai</sub>**, impacto ambiental del transporte del producto  $i$  desde la empresa hasta el nuevo cliente del neumático de ocasión
- **W<sub>2Ai</sub>**, Horas de MO de las operaciones de reintroducción del producto  $i$  en el mercado tipo ocasión

Por tanto, sería interesante saber a partir de qué valor de la distancia a la que se encuentra el cliente del neumático de ocasión sería más interesante intervenir para reacondicionarlo que venderlo directamente como neumático de ocasión.

Dicho de otra forma, ¿hasta qué valor podría incrementarse los parámetros dependientes de la distancia a la que se encuentra el cliente de ocasión para que la decisión más adecuada del producto fuese la reventa como neumático de ocasión y no cambiase? Para atender este tipo de cuestiones, podría ser interesante realizar un análisis de sensibilidad respecto aquellos valores que más pueden variar en función de cada sillón recuperado.

Pero habría muchos posibles análisis de sensibilidad, tantos como valores variables (ingresos por el producto como neumático de ocasión, gomilla o reacondicionamiento, ingresos por reciclaje o incineración de componentes, costes de transporte, costes de almacenaje, costes de reacondicionamiento, impacto ambiental de transportes, impacto ambiental de operaciones de intervención, tiempos de transportes, tiempos de operaciones, factores regionales, ...).

A continuación, se realizarán dos simulaciones para analizar cómo puede cambiar la alternativa prioritaria en función de la variación de los valores correspondientes a la distancia en la que se encuentra el cliente del neumático de ocasión ( $Coc_{ai}$ ,  $EIT_{2Ai}$  y  $W_{2Ai}$ ) y del tiempo de almacenaje del neumático antes de la reutilización ( $CS_{ti}$ ). En base a estas dos simulaciones se puede observar cómo la variación de los valores correspondientes a la distancia del cliente del neumático de ocasión y tiempo de almacenaje del neumático antes de la reutilización hacen fluctuar la decisión más adecuada de una alternativa a otra.

#### **15.5.2.1. *Distancia del cliente del neumático de ocasión***

La distancia a la que se encuentra el cliente del neumático de ocasión influirá en gran medida sobre la rentabilidad de la alternativa de reutilización del neumático como ocasión. En el ejemplo de aplicación genérico analizado, dicha distancia es de 100 km con respecto a la planta de recogida y clasificación. Desde el punto de vista de la elección de la alternativa más sostenible, si dicha distancia aumenta, perjudica a la alternativa de reutilización como neumático de ocasión, pero si dicha distancia se reduce le beneficia hasta ser elegida como prioritaria, considerando la misma ponderación actual de factores de sostenibilidad.

En la figura siguiente (Figura 261), se muestra una gráfica donde el eje de abscisas contiene valores de distancia del cliente del neumático de ocasión con respecto a la planta de recogida y clasificación, desde 0 Km a 300 €, y el eje de ordenadas indica valores del DPIIP, desde el valor 0 al 6. Se representa mediante una línea azul la evolución del DPIIP

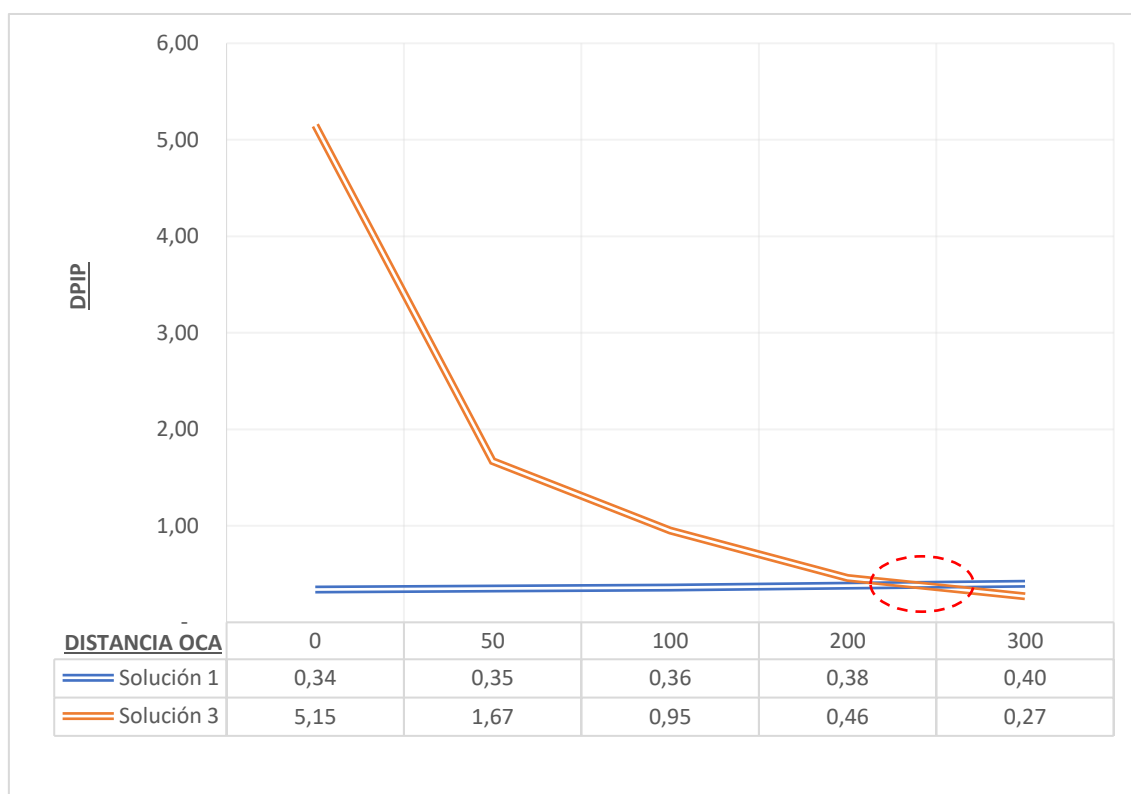
## PARTE V. APLICACIÓN.

### Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

de la alternativa de reutilización como neumático de ocasión, y mediante una línea marrón, la evolución del DPIIP de la alternativa Reacondicionamiento, en función de los valores que dependen directamente de la distancia a la que se encuentra el cliente de ocasión ( $Cocai$ ,  $EIT_{2Ai}$  y  $W_{2Ai}$ ), sin modificar el resto de los parámetros.

Partiendo del valor nulo de distancia (es el cliente el que se desplaza a la planta a recoger el neumático) se observa que, según aumenta dicho valor, el DPIIP de la alternativa de reutilización como ocasión va subiendo de manera ligera (línea azul de la figura). Esto significa que, según está más lejos el cliente, mayor es el coste de transporte y el impacto ambiental, haciendo que la alternativa de reutilización como neumático de ocasión se va alejando del punto ideal.

En contraprestación a esa subida, la alternativa de reacondicionamiento se ve favorecida y, a medida que aumenta la distancia, se va reduciendo el valor DPIIP de la alternativa.

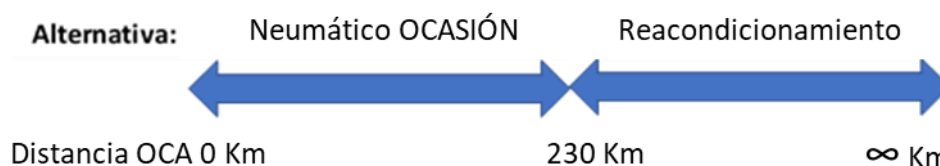


**Figura 320.** Evolución del valor DPIIP para las alternativas de outlet y reacondicionamiento según valores de Cref (Elaboración propia)

Lógicamente, a medida que aumenta el valor del DPIIP de la alternativa de ocasión y se va reduciendo el valor de la alternativa de reacondicionamiento, se llega a un punto en el

que se iguala ambos valores de DPIP, marcado con un círculo rojo discontinuo. Esto significa que, justo en este caso (*Distancia = 230 Km*), las dos alternativas serían equivalentes, dando el mismo resultado de DPIP. Sin embargo, para cualquier valor superior a 230 €, la alternativa más adecuada sería reacondicionar el neumático para venderlo como recauchutado, en vez de la venta como neumático de ocasión, es decir este valor de distancia marcará que, para un valor superior interesa reacondicionar y para un valor inferior interesa la reutilización como neumático de ocasión.

En la siguiente figura (Figura 321), se resumen los umbrales de las alternativas más sostenibles en función de la variación de la distancia a la que se encuentra el cliente del neumático de ocasión:



**Figura 321.** Umbrales de las alternativas más adecuadas en función del valor de la distancia a la que se encuentra el cliente del neumático de ocasión (Elaboración Propia)

#### 15.5.2.2. *Tiempo de almacenaje del neumático antes de la reutilización ( $CS_{li}$ ).*

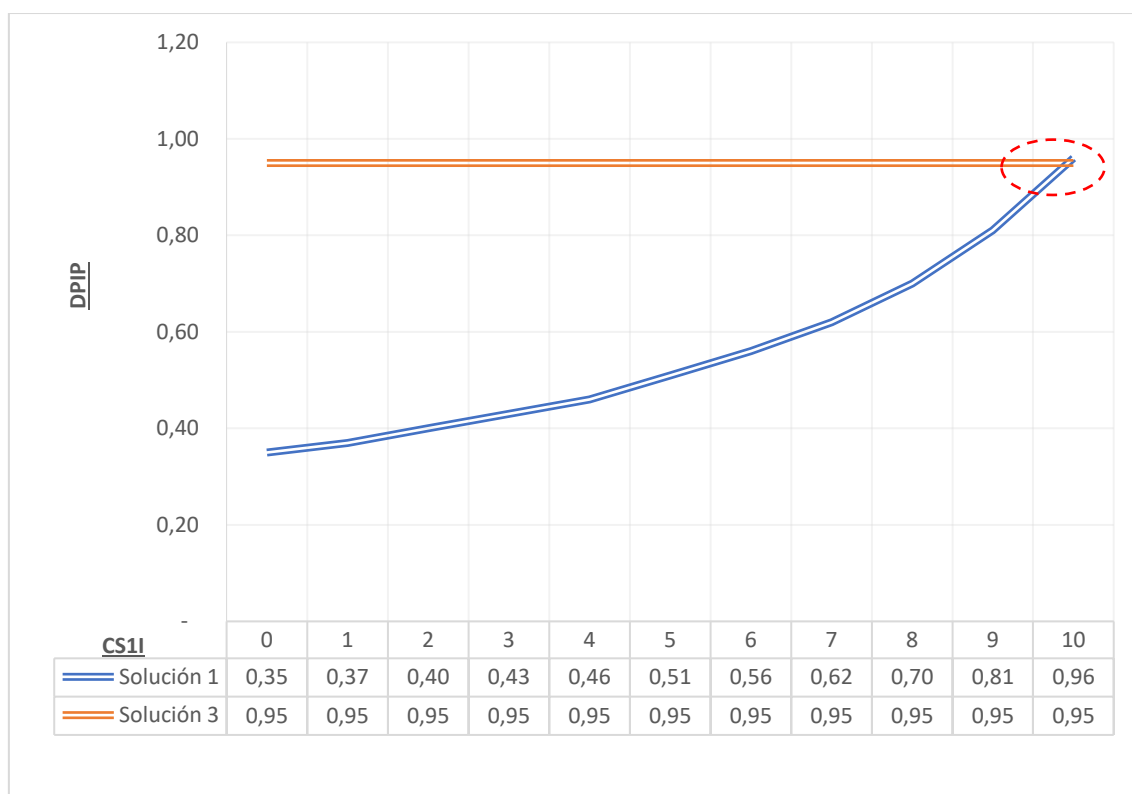
Otro parámetro que tiene gran influencia sobre la elección de la alternativa más idónea y **puede sufrir variaciones según cada producto**, mostrando además una posible influencia de la demanda, es el tiempo de almacenaje del neumático antes de la reutilización ( $CS_{li}$ ). En el ejemplo tipo analizado en este capítulo, se muestra como mejor alternativa, la reutilización del producto como neumático de ocasión. El tiempo medio de almacenaje del neumático antes de la reutilización contemplado como valor de referencia es de 2 meses ( $CS_{li} = 0'4 \text{ €/ud}$ ). En el caso que ese tiempo fuese inferior, y manteniendo constantes el resto de los valores, continuaría siendo la reutilización como neumático de ocasión la alternativa prioritaria. En cambio, si dichos costes de almacenaje fuesen mayores, llegaría un punto a partir del cual sería más conveniente reacondicionar el neumático que venderlo directamente como neumático de ocasión.

En la figura siguiente (Figura 261), se muestra una gráfica donde el eje de abscisas contiene valores del tiempo medio de almacenaje del neumático antes de la reutilización ( $CS_{li}$ ), desde 0 a 10, y el eje de ordenadas indica valores del DPIP, desde el valor 0 al

1'20. Se representa mediante una línea azul la evolución del DPIIP de la alternativa de reutilización como neumático de ocasión (Solución 1), y mediante una línea marrón, la evolución del DPIIP de la alternativa Reacondicionamiento (Solución 3), en función de los valores de  $CS_{li}$ , sin modificar el resto de los parámetros.

Partiendo del valor nulo de tiempo de almacenaje se observa que, según aumenta dicho valor, el DPIIP de la alternativa de reutilización como ocasión va subiendo (línea azul de la figura). Esto significa que, según pasa más tiempo el neumático en el almacén, mayor será el coste de almacenamiento, haciendo que la alternativa de reutilización como neumático de ocasión se vaya alejando del punto ideal.

Aunque a la alternativa de reacondicionamiento también le afecta dicho coste, pero en menor proporción, su DPIIP apenas se ve alterado, por tanto, apenas se modifica su DPIIP.

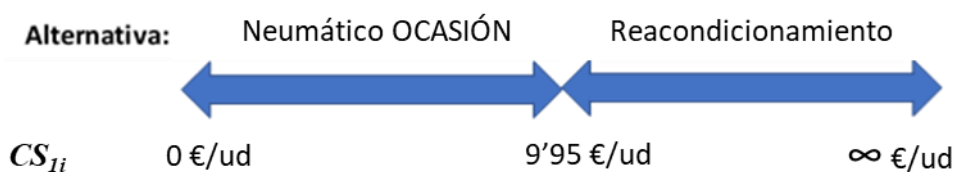


**Figura 322.** Evolución del valor DPIIP para las alternativas de outlet y reacondicionamiento según valores de  $C_{ref}$  (Elaboración propia)

Lógicamente, a medida que aumenta el valor del DPIIP de la alternativa de ocasión, se llega a un punto en el que se iguala ambos valores de DPIIP, marcado con un círculo rojo discontinuo. Esto significa que, justo en este caso ( $CS_{li} = 9'95 \text{ €/ud}$ ), las dos alternativas serían equivalentes, dando el mismo resultado de DPIIP. Sin embargo, para cualquier valor

superior de tiempo de almacenaje superior a 49'75 meses ( $CS_{II} = 9'95 \text{ €/ud}$ ), la alternativa más adecuada sería reacondicionar el neumático para venderlo como recauchutado, en vez de la venta como neumático de ocasión, es decir este valor del tiempo de almacenaje marcará que, para un valor superior interesa reacondicionar y para un valor inferior interesa la reutilización como neumático de ocasión.

En la siguiente figura (Figura 323), se resumen los umbrales de las alternativas más sostenibles en función de la variación del  $CS_{II}$ :



**Figura 323.** Umbrales de las alternativas más adecuadas en función del valor del tiempo de almacenaje previo antes de la reutilización (Elaboración Propia)

## 15.6. Conclusión

Cuando un neumático usado llega a la planta de recogida y clasificación, la principal misión de esta pasa por reintroducirlo de nuevo en el mercado, lo más pronto posible, al mayor precio y con mínima intervención, siendo la reutilización como neumático de ocasión como la alternativa más adecuada desde todos los puntos de vista. El problema es que, en la mayoría de los casos, estos productos que son recuperados no son aptos para seguir circulando sin intervenir sobre ellos ni tampoco existe una gran demanda al respecto, por ser una práctica poco habitual en nuestro país.

Debido a que las alternativas de disposición aportan una baja rentabilidad económica a la empresa, las operaciones de inspección y clasificación del neumático son operaciones clave dentro del PLI. Por ejemplo, cuando los neumáticos son designados como NFVU a valorizar, la rentabilidad económica obtenida no es demasiado grande para la empresa de recogida y clasificación, pero cuando se mandan a valorizar después de haber sido inicialmente designados como neumático NUR, se pierde dinero.

Ante la necesidad de consideración de gran cantidad de variantes y los pequeños márgenes beneficio resultantes de las distintas alternativas, resulta esencial revisar el procedimiento de preselección de destinos de neumáticos, siendo la herramienta propuesta un buen punto de partida.



Algunos parámetros de entrada que conviene tener controlados y que pueden influir en mayor o menor medida sobre la alternativa a escoger son los siguientes:

- **Variación en el tiempo de permanencia de los productos en el almacén de la planta de recogida y clasificación y de la planta recauchutadora.**

Si los NUR tardan mucho tiempo en salir de la planta de recogida y clasificación, el coste de almacenamiento sigue creciendo hasta llegar a un punto en el que puede que la operación ya no sea rentable. Por ello, si el tiempo de almacenaje va a ser muy elevado, puede resultar interesante enviar directamente el neumático a valorizar.

- **Variación en los valores de las subvenciones recibidas por parte de la administración.**

Las subvenciones que ofrece la administración a la planta de valorización son fundamentales para la rentabilidad del negocio, por tanto, es fundamental conseguir dichas subvenciones e incrementarlas a lo largo de los años para asegurarse la viabilidad del mismo.

- **Variación de resultados ante posible/s modificaciones/negociaciones en los precios de compra y venta.**

Los precios de compra y venta resultan fundamentales para el devenir del sistema, por tanto, conseguir unos buenos precios resultará esencial. En cambio, unos precios a la baja pueden suponer un grave trastorno económico en la empresa.

- **Variaciones en los resultados según las modificaciones de los destinos de los productos y componentes, sobre todo en aquellos que el transporte tenga un peso significativo.**

En este sentido pesará por el coste del transporte, el impacto ambiental generado en el mismo y el factor regional de la zona donde se realice el tratamiento.

En conclusión, la necesidad de inspección individual de cada neumático para identificar tanto su estado como la ausencia de cualquier anomalía y los escasos márgenes de beneficio en el que se encuentran las distintas alternativas así como la gran variedad de información que afecta a dicha decisión, hace fundamental la idea de mejorar dicho

proceso de clasificación, reforzado por herramientas como la que se propone en esta tesis y por toda clase de elementos que puedan ayudar a realizar una clasificación mucho más eficiente.

## 15.7. Referencias

Pérez Aparicio, R., & Saiz Rodríguez, L. (2018). Reciclado de neumáticos: transformación de un residuo en un recurso. *Revista de Plásticos Modernos*, 115, 11–18. <https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/04/reciclado-de-neumaticos-transformacion-de-un-residuo-en-un-recurso.pdf>

Real Decreto 2822/1998, de 23 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento General de Vehículos

Signus. (2017). Memoria anual 2017, CPF. <https://www.signus.es/memoria2017/>

Signus. (2018). Memoria anual 2018, CPF. <https://www.signus.es/memoria2018/>

## 15.8. Anexos

### 15.8.1. Anexo. Modelo Matemático de aspectos económicos en lenguaje MPL.

TITLE

ReverseLogisticTreatmentModelBBDD;

OPTIONS

DatabaseType=Access;

DatabaseAcces="RLTM.mdb";

INDEX

i := DATABASE ("Products", "IdProduct");

j := DATABASE ("Components", "IdComponent");

DATA

Soca[i] := DATABASE ("Products", "Soca");

Sgom[i] := DATABASE ("Products", "Sgom");

Sref[i] := DATABASE ("Products", "Sref");

SUBi[i] := DATABASE ("Products", "SUBi");

Srec[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Srec");

Sbur[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "Sbur");

SUBij[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SUBij");

CT1[i] := DATABASE ("Products", "CT1");

## PARTE V. APLICACIÓN.

### Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

---

```
CIS[i] := DATABASE ("Products", "CIS");
COP[i] := DATABASE ("Products", "COP");
CS1[i] := DATABASE ("Products", "CS1");
Coca[i] := DATABASE ("Products", "Coca");
Cgom[i] := DATABASE ("Products", "Cgom");
Cref[i] := DATABASE ("Products", "Cref");
CT3[i,j] := DATABASE ("Prod_Comp", "CT3");
CL[i,j] := DATABASE ("Prod_Comp", "CL");
CS2[i,j] := DATABASE ("Prod_Comp", "CS2");
CT4[i,j] := DATABASE ("Prod_Comp", "CT4");
Crec[i,j] := DATABASE ("Prod_Comp", "Crec");
CT5[i,j] := DATABASE ("Prod_Comp", "CT5");
Cbur[i,j] := DATABASE ("Prod_Comp", "Cbur");
Crm[i,j] := DATABASE ("Prod_Comp", "Crm");
```

#### VARIABLES

```
OCA[i]      EXPORT TO DATABASE ("Products" , "OCASION");
GOM[i]      EXPORT TO DATABASE ("Products" , "GOMILLA");
REF[i]      EXPORT TO DATABASE ("Products" , "REFURBISH");
REC[i,j]    EXPORT TO DATABASE ("Prod_Comp" , "RECYCLE");
BUR[i,j]    EXPORT TO DATABASE ("Prod_Comp" , "BURNING");
```

#### MACROS

```
IngMer := SUM(i: Soca[i] * OCA + Sgom[i] * GOM + Sref[i] * REF);
IngCom := SUM (i,j: Srec[i,j] * REC);
IngInc := SUM (i,j: Sbur[i,j] * BUR);
IngSUB1 := SUM (i: SUBi[i] * OCA + SUBi[i] * GOM + SUBi[i] * REF);
IngSUB2 := SUM (i,j: SUBij[i,j] * REC + SUBij[i,j] * BUR);
CSim := SUM(i: CT1[i] + CIS[i]);
CmerOCA := SUM(i: COP[i] * OCA + CS1[i] * OCA + Coca[i] * OCA);
CmerGOM := SUM(i: COP[i] * GOM + CS1[i] * GOM + Cgom[i] * GOM);
CmerREF := SUM(i: COP[i] * REF + CS1[i] * REF + Cref[i] * REF);
CcomREC := SUM (i,j: CT3[i,j]* REC + CL[i,j] * REC + CS2[i,j] * REC + CT4[i,j] * REC +
Crec[i,j] * REC);
CDesBUR := SUM (i,j: CT3[i,j]* BUR + CL[i,j] * BUR + CS2[i,j] * BUR + CT5[i,j] * BUR +
Cbur[i,j] * BUR + Crm[i,j] * BUR);
```

#### MODEL

MAX Beneficio

```
EXPORT TO DATABASE ("Products" , "BENEFICIO")
```

## PARTE V. APLICACIÓN.

### Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

---

$$= \text{IngMer} + \text{IngCom} + \text{IngInc} + \text{IngSUB1} + \text{IngSUB2} - \text{CSim} - \text{CmerOCA} - \text{CmerGOM} - \text{CmerREF} - \text{CcomREC} - \text{CDesBUR};$$

SUBJECT TO

LimitAlter[i,j] -> LAlt;

$$\text{OCA}[i] + \text{GOM}[i] + \text{REF}[i] + \text{REC}[i,j] + \text{BUR}[i,j] = 1;$$

BINARY

GOM[i];

REF[i];

REC[i,j];

BUR[i,j];

BOUNDS

REC[i,2]=0;

BUR[i,1]=0;

END

#### 15.8.2. Anexo. Modelo Matemático de aspectos ambientales en lenguaje MPL.

TITLE

ReverseLogisticTreatmentModelBBDDamb;

OPTIONS

DatabaseType=Access;

DatabaseAcces="RLTMamb.mdb";

INDEX

i := DATABASE ("Products", "IdProduct");

j := DATABASE ("Components", "IdComponent");

DATA

EIT1[i] := DATABASE ("Products", "EIT1");

EIT2A[i] := DATABASE ("Products", "EIT2A");

EIT2B[i] := DATABASE ("Products", "EIT2B");

EIT2C[i] := DATABASE ("Products", "EIT2C");

EIT3[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "EIT3");

EIT4[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "EIT4");

EIT5[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "EIT5");

EIP1[i] := DATABASE ("Products", "EIP1");

EIP2[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "EIP2");

EIR[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "EIR");

EII[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "EII");

VARIABLES

OCA[i] EXPORT TO DATABASE ("Products" , "OCASION");  
 GOM[i] EXPORT TO DATABASE ("Products" , "GOMILLA");  
 REF[i] EXPORT TO DATABASE ("Products" , "REFURBISH");  
 REC[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp" , "RECYCLE");  
 BUR[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp" , "BURNING");

MACROS

EIComun := SUM(i:EIT1[i]);  
 EImerOCA := SUM(i:EIT2A[i] \* OCA);  
 EImerGOM := SUM(i:EIT2B[i] \* GOM);  
 EImerREF := SUM(i:EIT2C[i] \* REF + EIP1[i]\* REF);  
 EIcomREC := SUM (i,j: EIT3[i,j] \* REC + EIP2[i,j] \* REC + EIT4[i,j] \* REC + EIR[i,j] \* REC);  
 EIdesBUR := SUM (i,j: EIT3[i,j] \* BUR + EIP2[i,j] \* BUR + EIT5[i,j] \* BUR + EII[i,j] \* BUR);

MODEL

MIN EnvironmentalImpact = EIComun + EImerOCA + EImerGOM + EImerREF + EIcomREC  
 + EIdesBUR;

SUBJECT TO

LimitAlter[i,j] -> LAlt:  
 OCA[i] + GOM[i] + REF[i] + REC[i,j] + BUR[i,j] = 1;

BINARY

OCA[i];  
 GOM[i];  
 REF[i];  
 REC[i,j];  
 BUR[i,j];

BOUNDS

REC[i,2]=0;  
 BUR[i,1]=0;

END

15.8.3. **Anexo.** Modelo Matemático de aspectos sociales en lenguaje MPL.

TITLE

ReverseLogisticTreatmentModelBBDDsoc2;

OPTIONS

## PARTE V. APLICACIÓN.

### Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.

---

DatabaseType=Access;

DatabaseAcces="RLTMsoc2.mdb";

#### INDEX

i := DATABASE ("Products", "IdProduct");

j := DATABASE ("Components", "IdComponent");

#### DATA

SI1[i] := DATABASE ("Products", "SI1");

SI2A[i] := DATABASE ("Products", "SI2A");

SI2B[i] := DATABASE ("Products", "SI2B");

SI2C[i] := DATABASE ("Products", "SI2C");

SI3[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SI3");

SI4[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SI4");

SI5[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SI5");

SIREF[i] := DATABASE ("Products", "SIREF");

SIV[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SIV");

SIREC[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SIREC");

SIBUR[i,j] := DATABASE ("Prod\_Comp", "SIBUR");

#### VARIABLES

OCA[i] EXPORT TO DATABASE ("Products", "OCASION");

GOM[i] EXPORT TO DATABASE ("Products", "GOMILLA");

REF[i] EXPORT TO DATABASE ("Products", "REFURBISH");

REC[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp", "RECYCLE");

BUR[i,j] EXPORT TO DATABASE ("Prod\_Comp", "BURNING");

#### MACROS

SIComun := SUM(i:SI1[i]);

SImerOCA := SUM(i:SI2A[i] \* OCA);

SImerGOM := SUM(i:SI2B[i] \* GOM);

SImerREF := SUM(i:SI2C[i] \* REF + SIREF[i] \* REF);

SIcomREC := SUM (i,j: SI3[i,j] \* REC + SIV[i,j] \* REC + SI4[i,j] \* REC + SIREC[i,j] \* REC);

SIdesBUR := SUM (i,j: SI3[i,j] \* BUR + SIV[i,j] \* BUR + SI5[i,j] \* BUR + SIBUR[i,j] \* BUR);

#### MODEL

MAX SocialImpact = SIComun + SImerOCA + SImerGOM + SImerREF + SIcomREC + SIdesBUR;

#### SUBJECT TO

LimitAlter[i,j] -> LAlt;

**PARTE V. APLICACIÓN.**

**Capítulo 15. Ejemplo de aplicación del MR a una empresa de neumáticos usados.**

---

$$OCA[i] + GOM[i] + REF[i] + REC[i,j] + BUR[i,j] = 1;$$

BINARY

OCA[i];

GOM[i];

REF[i];

REC[i,j];

BUR[i,j];

BOUNDS

REC[i,2]=0;

BUR[i,1]=0;

END

**PARTE VI. CONCLUSIONES Y  
LÍNEAS FUTURAS DE  
INVESTIGACIÓN**



## **Capítulo 16. Conclusiones**

## 16.1. Contribución de la investigación

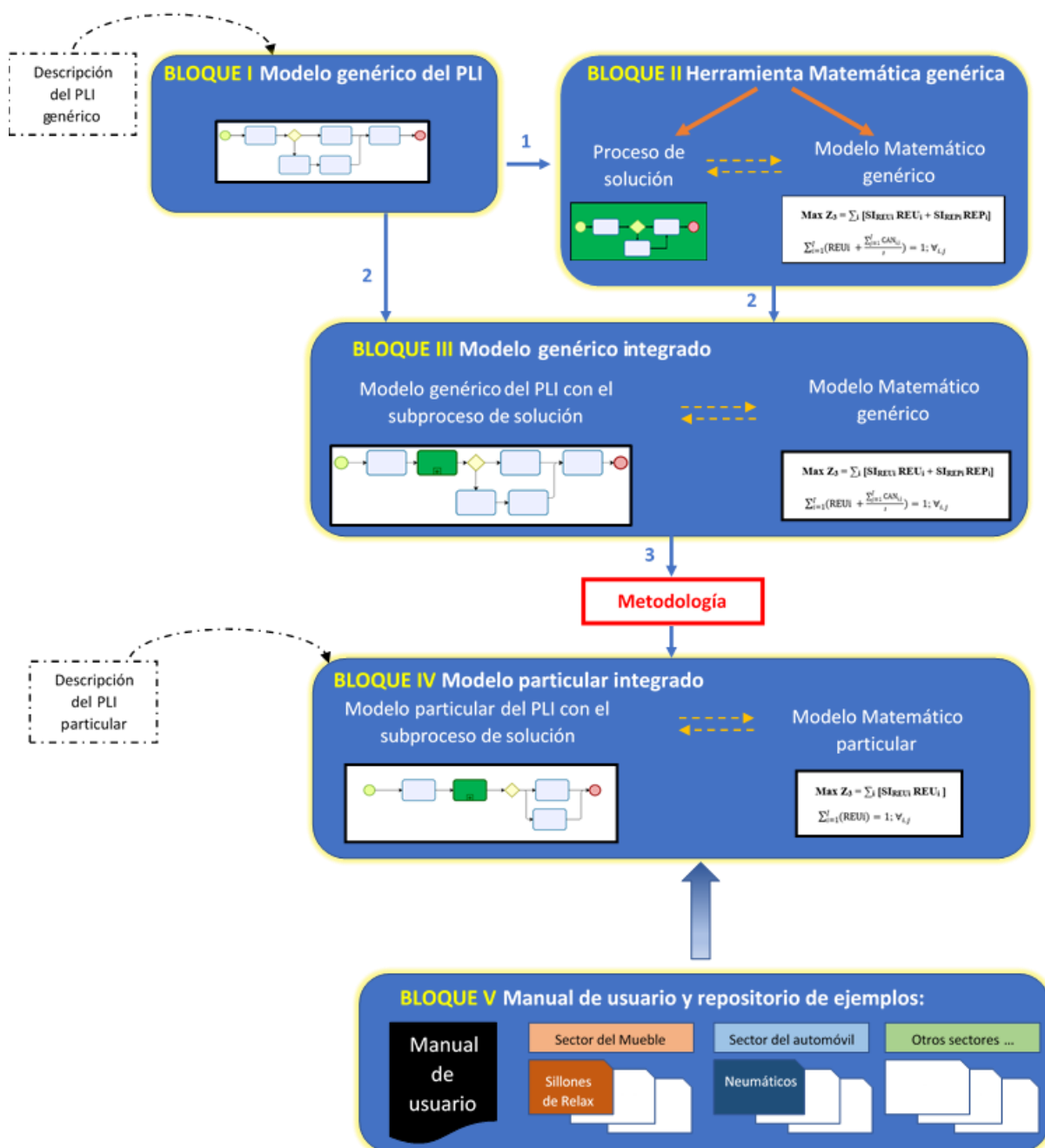
La principal contribución de la presente investigación es un Marco de Referencia que permite afrontar los principales problemas detectados en el ámbito de la LI: Falta de estandarización y formalización del PLI, ineficiencia en la toma de decisiones sobre la disposición del producto y falta de consideración de factores ambientales y sociales en las decisiones de LI.

La solución planteada respecto a la falta de estandarización y formalización del PLI se fundamenta en el modelado de procesos, presentando un modelo genérico de PLI (Bloque I), y los problemas sobre la ineficiencia en la toma de decisiones y la falta de consideración de factores se afrontan mediante el diseño de una herramienta de ayuda a la toma de decisiones, basada en el modelado matemático (Bloque II).

Asimismo, el Marco de Referencia presenta dos características esenciales que lo hacen especialmente interesante. Por un lado, presenta un modelo genérico integrado que combina ambos tipos de modelado (matemático y de procesos) incluyendo como subproceso del modelo genérico del PLI, el proceso de solución de la herramienta matemática (Bloque III). Y, por otro lado, desarrolla una metodología para adaptar dicho modelo genérico integrado a cada caso particular (Bloque IV).

Además, se ha conseguido aplicar dicha metodología en dos empresas reales con diferentes tipologías de LI: una empresa de sillones de relax, con LI de lazo cerrado, y otra empresa de neumáticos, con LI de lazo abierto. Precisamente, estas dos aplicaciones, junto con el manual de usuario desarrollado para facilitar la ejecución de la herramienta matemática a las empresas, pasan también a formar parte de un nuevo bloque del MR (Bloque V), en el que se pretende generar un repositorio de casos de aplicación y ejemplos. Estos casos de aplicación se organizarían o agruparían por sectores de actividad y por similitud, de forma que sean más fáciles de localizar y manejar cuando haga falta.

En la figura siguiente (Figura 324) se muestra el Marco de Referencia, como núcleo principal de la tesis, con la incorporación de este Bloque V compuesto por el manual de usuario para la recuperación de productos y el repositorio de empresas que se pretende ir generando en el MR.



**Figura 324.** Marco de Referencia propuesto con la incorporación del Bloque V (Elaboración Propia)

En la presente tesis, se ha identificado la importancia de la logística inversa, se ha destacado la DD de los productos como la más importante y compleja de todas las decisiones del PLI, consiguiendo crear un MR que facilite la formalización del PLI y la toma de decisiones en cuanto a la disposición de los productos.

En un entorno cambiante en que los valores de los parámetros se actualizan constantemente y donde se maneja mucha información para tomar la decisión, por parte de uno o varios decisores, resulta fundamental utilizar el MR para tener el PLI

formalizado y conseguir que dicha decisión pueda ser tomada de manera ágil y eficiente. Asimismo, el MR facilita la toma de decisión en base a las tres dimensiones de la sostenibilidad, favoreciendo el cambio de modelo de negocio de las empresas hacia modelos más sostenibles, no solo favoreciendo el entendimiento y la incorporación del PLI sino, además, haciendo que este sea realmente sostenible. Al mismo tiempo, favorece la transformación de la política fija en cuanto a la DD, en una política dinámica y actualizada que permite tomar la mejor decisión sobre cada producto.

Por tanto, la investigación no solo realiza una aportación al mundo empresarial mediante el desarrollo del Marco de Referencia y su aplicación real en dos ejemplos reales, sino que también realiza un aporte teórico a la base de conocimiento científico en forma de marco que combina modelado matemático y de procesos para formalizar el PLI y aportar una herramienta de ayuda a la toma de decisiones en el ámbito de la LI, concretamente sobre la decisión más compleja como es la DD.

## **16.2. Respuesta a las preguntas de investigación**

En el capítulo 1 se lanzaba un planteamiento general que englobaba todo el conjunto de problemas identificado, dos preguntas generales de investigación para la presente tesis y tres cuestiones específicas, que han sido abordadas por diferentes apartados. A continuación, se explica cómo la presente investigación afronta el planteamiento general de investigación y responde a las diferentes preguntas generales y cuestiones específicas planteadas.

### **Planteamiento general de investigación:**

- **¿PODRÍA CREARSE UN MARCO DE REFERENCIA QUE INTEGRASE LA FORMALIZACIÓN DEL PLI Y EL DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE AYUDA PARA LA TOMA DE LA DD DESDE UN ENFOQUE EFICIENTE Y SOSTENIBLE?**

La formalización y estandarización del PLI se consigue a través del modelado de procesos, mediante la creación del modelo genérico del PLI. El enfoque eficiente y sostenible de la DD se obtiene a través de la herramienta matemática creada, compuesta por el modelo matemático genérico y el proceso de solución. El MR-DIMPM-LI presentado en esta tesis combina el modelado de procesos con el modelado matemático, integrando el proceso de solución de la herramienta

matemática como un subproceso del modelo genérico del PLI. De esta forma, se integra la formalización del PLI y la herramienta de ayuda para la toma de decisiones en un mismo Marco de Referencia. Además, el MR-DIMPM-LI es adaptable a cualquier caso concreto, facilitando así su uso en todo el contexto de la LI.

**Preguntas generales de investigación:**

- **¿CÓMO SE PODRÍA FORMALIZAR O ESTANDARIZAR EL PROCESO DE LI EN UNA EMPRESA?**

Una empresa puede formalizar su PLI a partir del Modelo genérico del PLI (Bloque I del MR-DIMPM-LI). Para ello, la empresa debe proporcionar la información de entrada al proceso en base a su PLI, eliminar aquellos pasos que no le sean de aplicación y adaptar el resto de las operaciones a su propio contexto.

- **¿CÓMO SE PODRÍA AYUDAR A UNA EMPRESA TOMAR LA DD DE LA MANERA MÁS EFICIENTE Y SOSTENIBLE POSIBLE?**

Una empresa puede conseguir un alto nivel de eficiencia al tomar la DD utilizando herramientas matemáticas de ayuda a la toma de decisiones, como la propuesta en esta tesis (Bloque II del MR-DIMPM-LI), permitiéndole obtener respuestas rápidas y precisas aun teniendo que utilizar elevados volúmenes de información. Además, se puede conseguir que la decisión se tome de manera sostenible al incluir aspectos económicos, ambientales y sociales en su función objetivo, como es el caso de la herramienta propuesta en este MR.

**Cuestiones específicas:**

- **¿PODRÍA DESCRIBIRSE DE FORMA ESPECÍFICA UNA METODOLOGÍA QUE DÉ SOPORTE Y GUÍE A LAS EMPRESAS QUE PRETENDAN TOMAR LA DD DE LA MANERA MÁS EFICIENTE Y SOSTENIBLE POSIBLE?**

La combinación del modelo genérico del PLI (Bloque I) y la herramienta matemática genérica (Bloque II), da lugar al modelo genérico integrado (Bloque III del MR-DIMPM-LI) en el que se abarca la problemática principal de la LI.

Para poder aplicar el MR en cada caso concreto, se describe una metodología que permite adaptar el modelo genérico integrado a cada modelo particular (Bloque IV del MR-DIMPM-LI). Además, se ha desarrollado también un manual de usuario para que sea la propia empresa la que pueda ejecutar la herramienta matemática para cada producto recuperado o devuelto.

- **¿PODRÍA DESARROLLARSE UNA HERRAMIENTA QUE EVALÚE LAS DISTINTAS ALTERNATIVAS POSIBLES ANTE LA DD EN BASE A FACTORES ECONÓMICOS, AMBIENTALES Y SOCIALES?**

La herramienta matemática planteada en el Bloque II del MR-DIMPM-LI contempla todas las posibles alternativas de disposición de LI. En ella, se valoran factores económicos, ambientales y sociales para obtener la mejor alternativa de disposición en cada caso concreto.

- **¿QUÉ TIPO DE INFORMACIÓN NECESITARÍA MANEJAR LA EMPRESA PARA PODER TOMAR LA DD DE MANERA SOSTENIBLE Y EFICIENTE?**

La información que necesita manejar la empresa para tomar la DD de manera sostenible y eficiente es de naturaleza distinta. Por un lado, la empresa debe ser capaz manejar la información sobre su propio PLI para adaptar el modelo genérico integrado, junto con la ayuda de un consultor, al caso concreto de la empresa, concretando las alternativas de disposición factibles y los parámetros económicos, ambientales y sociales referentes a cada alternativa de disposición.

Por otro lado, la empresa necesitará recopilar información con respecto a cada producto, a partir de datos que le ofrezca el cliente (estado del producto, fecha de compra, precio de adquisición y ubicación actual) y datos que debe manejar la propia empresa (transportes disponibles, dimensiones del producto, demanda actual del producto y leyes referentes al mismo). Con toda esta información, se calcularán los valores de los parámetros de la herramienta y se podrá ejecutar el proceso de solución para obtener la mejor disposición en cada producto.

### 16.3. Cumplimiento de los objetivos propuestos

En este apartado se comenta el grado de alcance de los objetivos propuestos al comienzo de la tesis (apartado 1.3). En primer lugar, se presenta el objetivo principal de la tesis y, en segundo lugar, los objetivos alcanzados según las partes de la tesis:

#### *Objetivo Principal:*

**Desarrollar un Marco de Referencia que sirva de ayuda para la gestión de la LI, combinando el modelado de procesos y el modelado matemático, que guíe en la formalización del PLI y facilite la eficiencia y la sostenibilidad en la DD para cada caso concreto**

Los principales problemas de la gestión de la LI se centran en la falta de estandarización y formalización del PLI, en la ineficiencia en la toma de la DD y en la falta de consideración de factores ambientales y, sobre todo, sociales en las decisiones de la LI.

El Marco de Referencia, planteado como núcleo general de la tesis, da respuesta a los objetivos identificados con respecto a estos principales problemas:

- Respecto a la **formalización del PLI:**

Se han identificado las principales actividades que forman parte del PLI para ayudar a las empresas a definir sus procesos de logística inversa, documentarlos y adaptarlos a la realidad de cada caso. El Bloque I del MR-DIMPM-LI se ha destinado a formalizar el PLI mediante el modelado de procesos.

- Respecto a la **eficiencia en las decisiones:**

Se ha desarrollado una herramienta de ayuda a la toma de decisiones, basada en MM para ayudar al decisor a tomar la mejor decisión de disposición del producto en cada situación, con la máxima rapidez y precisión, independientemente de que haya que utilizar para ello un gran volumen de datos.

- Respecto a la **sostenibilidad en las decisiones:**

Se han considerado las tres dimensiones de la sostenibilidad (económica, ambiental y social) para tomar la DD con el mayor grado de sostenibilidad

posible. Tanto la eficiencia en la toma de la DD, como la incorporación de los tres factores de sostenibilidad (económicos, ambientales y sociales) se han abordado en el Bloque II del MR-DIMPM-LI. Posteriormente, se implementa un nuevo bloque (Bloque III) en el que se combinan los dos bloques anteriores, mostrando un modelo genérico integrado, con la inclusión del proceso de solución para la herramienta matemática genérica como subproceso del proceso genérico de LI, junto con el modelo matemático genérico.

De esta forma, se configura el Marco de Referencia (Figura 324) que consigue abordar toda la problemática principal que dificulta la gestión de la LI, sirviendo al mismo tiempo para que cada empresa pueda formalizar su PLI y mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en la toma de decisiones sobre la disposición de los productos devueltos o recuperados.

***Objetivos alcanzados según las partes de la tesis:***

- **Objetivos genéricos del estado del arte:**
  1. Se ha verificado la inexistencia de marcos de referencia, herramientas o metodologías que aporten una formalización del proceso de Logística Inversa, abordando la problemática de la eficiencia de la toma de decisiones y la sostenibilidad en la decisión sobre la disposición.
  2. Se ha realizado un estado del arte sobre las áreas consideradas fundamentales en cuanto a la problemática que se desea abordar. Estas áreas son: a) Logística Inversa, b) El proceso de Logística Inversa y c) Decisión sobre la disposición de productos de Logística Inversa (DD).
  3. Se han analizado los puntos abordados, mayoritariamente, en los trabajos que abordan la problemática sobre la DD en el ámbito de la Logística Inversa. Destacando su complejidad en cuanto a la elevada incertidumbre que tiene asociada, por precisar un tratamiento independiente, único y concreto para cada producto y por estar influenciada por gran cantidad de aspectos diferentes y su importancia por su gran impacto sobre la CdS y sobre el cliente.
  
- **Objetivos respecto a la parte del estado del arte sobre Logística Inversa:**



4. Se ha presentado el concepto de Logística Inversa a través de las principales definiciones, seleccionando la definición siguiente como la más acorde con el contenido del trabajo: *“Se entiende como Logística Inversa, el proceso de gestión del flujo de materias primas, inventario en proceso y productos terminados, desde un punto de fabricación, distribución o uso a un punto de recuperación o de eliminación adecuada”*.
  5. Se han identificado como sectores industriales más representativos en los que se da la LI los siguientes:
    - i. Sector de fabricación de productos informáticos y electrónicos
    - ii. Sector de los vehículos a motor
    - iii. Sector de fabricación de material y equipo eléctrico
    - iv. Sector de recogida, tratamiento y eliminación de residuos
  6. Se han expuesto y diferenciado las tipologías más comunes de sistemas de Logística Inversa, diferenciando principalmente entre LI de lazo cerrado y de lazo abierto. En la LI de lazo cerrado los productos vuelven a sus productores/distribuidores originales, mientras que en la LI de lazo abierto los productos recogidos son tratados por agentes especializados en LI
- **Objetivos respecto a la parte del estado del arte sobre decisiones en el proceso de Logística Inversa:**
    7. Se ha mostrado una visión general del PLI que identifica las tres etapas principales del mismo: Recogida y transporte, inspección y valoración y la disposición final. Dicha información se ha completado con la descripción de los posibles eventos de inicio del proceso (devoluciones y recuperación de productos) y de los posibles tratamientos aplicables a los productos recuperados o devueltos en un ámbito de LI (reventa/reutilización, reparación, reacondicionamiento, remanufactura, canibalización, reciclaje, incineración y vertido).

8. Se han identificado las principales decisiones del PLI a través de una revisión bibliográfica en el ámbito de la LI.
9. Se han inferido las decisiones clave en el proceso de LI a partir de las variables de decisión utilizadas en los modelos matemáticos en un contexto de LI.
10. Se han descrito las decisiones clave de la LI, agrupadas inicialmente por similitud en los siguientes grupos:
  - i. Estructura y capacidad de la red de LI.
    1. Red de LI propia
    2. Red de LI colaborativa
  - ii. Políticas empresariales.
    1. Política de precios
    2. Política de devoluciones
  - iii. Planificación de la producción con productos recuperados
  - iv. Rutas logísticas
  - v. Disposición del producto
- **Objetivos respecto a la parte del estado del arte sobre la decisión de disposición del producto:**
  11. Se ha justificado el interés por el estudio de la DD debido a su elevada importancia y complejidad.
  12. Se ha razonado la importancia del estudio de aspectos económicos, ambientales y sociales a considerar en la DD, desde un enfoque sostenible para conseguir un cambio de modelos de negocio hacia modelos más sostenibles.
  13. Se ha justificado el uso de las herramientas matemáticas para conseguir una toma de decisiones eficiente en el contexto de la LI debido a su robustez y su carácter multidimensional.

14. Se ha revisado la bibliografía de los principales modelos matemáticos diseñados en el ámbito de la toma de decisiones sobre alternativas de disposición, observando cómo todos los trabajos incorporan aspectos económicos, algunos utilizan también aspectos ambientales y cómo se están empezando a incluir aspectos sociales en la DD.
- Objetivos respecto a la parte de la **propuesta sobre la descripción del problema:**
    15. Se ha descrito detalladamente el problema a resolver, mostrando la trascendencia de este sobre la empresa y su entorno.
    16. Se ha aportado una propuesta de solución integrada para resolver la principal problemática de la LI en todo su ámbito.
  - Objetivos respecto a la parte de la **propuesta de Marco de Referencia:**
    17. Se ha propuesto un Marco de Referencia que satisface las siguientes necesidades detectadas: **ayudar a formalizar el proceso de LI, dar soporte al decisor respecto a la DD de manera que se pueda tomar con las mayores garantías y eficiencia, proporcionar los parámetros necesarios para poder tomar la DD en base criterios de sostenibilidad y facilitar la adaptabilidad a cada caso particular.**
    18. Se han identificado las funcionalidades que debe cubrir el Marco de Referencia y los bloques que lo componen, así como la relación entre funcionalidades y bloques.
  - Objetivos respecto a la parte de la **propuesta de modelo genérico del PLI:**
    19. Se han relacionado las causas que activan el proceso de LI con respecto a las diferentes alternativas de disposición de productos.
    20. Se ha aportado información característica de las decisiones clave de LI, tal como su ubicación sobre configuraciones genéricas de CdS para favorecer el entendimiento de la gestión del PLI.
    21. Se ha propuesto un modelo genérico del PLI que facilite la formalización del proceso, representando en él el flujo de las decisiones y el momento en el que se toman.

- Objetivos respecto a la parte de la **propuesta del modelo matemático:**
  22. Se ha definido el problema a resolver de manera estructurada como un problema de optimización multi-objetivo modelado a través de programación lineal
  23. Se han identificado y descrito los principales aspectos económicos, ambientales y sociales referentes a cada una de las alternativas de disposición de LI.
  24. Se ha descrito un modelo matemático de aplicación, con toda la información anterior, para facilitar la elección de la alternativa de disposición más adecuada. Se han presentado los índices, los parámetros necesarios, las variables de decisión, la función objetivo y la restricción que compone el modelo.
- Objetivo respecto a la parte de la **propuesta del proceso de solución:**
  25. Se ha descrito y justificado el proceso de solución para obtener la mejor alternativa de disposición de LI como un proceso de solución multi-objetivo, basado en los métodos de programación por compromiso y suma ponderada y teniendo clara la necesidad de ponderación y normalización de los valores.
- Objetivos respecto a la parte de la **validación mediante experimentación:**
  26. Se han mostrado los requerimientos necesarios para cuantificar la rentabilidad económica, el impacto ambiental y el impacto social de las diferentes alternativas.
  27. Se ha validado el correcto funcionamiento del modelo matemático propuesto, mediante experimentación con baterías de valores económicos, ambientales y sociales que han tratado de recoger toda la casuística posible.
  28. Se ha validado el proceso de solución propuesto para determinar la mejor disposición del producto bajo un enfoque de optimización multi-objetivo

- Objetivo respecto a la parte de la **propuesta del Modelo genérico del PLI con el subproceso de solución y modelo matemático genérico:**

29. Se ha propuesto un modelo genérico del PLI, incorporando en él el proceso de solución de la herramienta matemática, como un subproceso clave.

- Objetivo respecto a la parte de la **propuesta del Modelo particular del PLI con el subproceso de solución y modelo matemático particular:**

30. Se ha definido la metodología para adaptar los modelos genéricos anteriormente expuestos a cada caso concreto de empresa y/o CdS.

- Objetivos respecto a la **aplicación del Marco de Referencia:**

31. Se ha verificado la validez del Marco de Referencia propuesto y se ha mostrado su adaptabilidad a dos ejemplos de aplicación reales de tipos de LI diferentes, una de lazo cerrado y otra de lazo abierto.

32. Se ha aplicado la metodología de adaptación para obtener el modelo particular integrado de PLI adaptado a cada uno de los dos ejemplos de aplicación presentados.

33. Se ha ejecutado el proceso de solución para identificar las circunstancias que hacen más conveniente una alternativa u otra en la DD, determinando cuál sería la disposición más adecuada para cada ejemplo de aplicación concreto.

#### **16.4. Ámbito de aplicación del Marco de Referencia**

El Marco de Referencia ha sido diseñado y concebido para atender las necesidades de los decisores en cuanto al diseño y formalización del PLI y a la elección de la alternativa de disposición de los productos devueltos o recuperados, en todo tipo de empresas con LI. Pero lo verdaderamente importante, es que el MR se puede aplicar a cualquier empresa, de cualquier sector, que trate con productos devueltos y/o recuperados y tenga que decidir qué hacer con cada uno de ellos.

Como ejemplo de su utilidad en empresas y sectores diferentes se ha aplicado en dos ejemplos reales con PLI bien diferentes. Por un lado, el MR ha sido aplicado en una empresa de sillones de relax con un PLI de lazo cerrado, donde los mismos fabricantes del producto original tratan su disposición. Por otro lado, el MR ha sido aplicado en una

empresa de neumáticos con un PLI de lazo abierto, donde especialistas en productos recuperados se encargan de determinar la mejor disposición de cada producto.

Cabe tener en cuenta que, generalmente, las empresas que trabajan en el ámbito de la LI de lazo abierto tienen en la LI una oportunidad de negocio que cubre su principal foco de mercado. En cambio, las empresas que intervienen en el ámbito de la LI de lazo cerrado tienen en la LI un problema a resolver sobre el que deben tratar de obtener el máximo valor posible, siendo muchas veces su principal preocupación no perder mucho dinero ni tiempo. Por tanto, el ámbito del MR-DIMPM-LI abarca cualquier empresa de cualquier sector que tenga opción de tratar con productos devueltos o recuperados.

Asimismo, cada vez que se aplique el Marco de Referencia a un ejemplo de aplicación, puede aparecer una realidad o una casuística diferentes a las contempladas que ofrezca detalles a analizar para ver si se puede mejorar el marco. Por ejemplo, puede aparecer una actividad que no se haya contemplado en el modelo genérico y al definirla en un caso particular, puede resultar interesante introducirla en el modelo genérico, enriqueciendo así el MR-DIMPM-LI. En este sentido, se consigue establecer una mejora continua en el Marco de Referencia aplicando un sentido circular a la metodología de adaptación.

### **16.5. Limitaciones**

Las principales limitaciones encontradas al llevar a cabo la presente investigación se describen a continuación:

- Limitaciones en cuanto a la adaptación del modelo genérico al modelo particular

La adaptación del modelo genérico integrado fuerza a representar, mediante el modelado de procesos, el PLI de cada caso concreto. Aunque el modelo del PLI genérico intenta recoger toda la casuística posible, es posible que haya que modificar dicho modelo, en algunos casos, para poder representar fielmente la realidad del PLI de algún caso particular. Esto se podrá ir resolviendo conforme se vaya ampliando el repositorio de aplicaciones a otras empresas y sectores.

Al mismo tiempo, los parámetros determinados en el modelo matemático genérico también pueden verse alterados o fusionados con otros, para adaptarse mejor a la realidad de cada caso.

- Limitaciones en cuanto a los valores económicos aportados por las empresas.

Los valores de los parámetros económicos aportados por las empresas, objeto de estudio en los ejemplos de aplicación, han sido calculados de manera aproximada, debido a que no tenían el nivel de detalle exigido en cada parámetro y, en algunos casos, tenían los datos muy detallados, pero no estructurados como se necesitaban en el modelo.

- Limitaciones en cuanto al software utilizado para la obtención del valor ambiental de las alternativas.

La obtención de los valores ambientales para la ejecución del proceso de solución se ha realizado en base al software OpenLCA, con el método ReCiPe Endpoint (H,A) y según las BBDD “ELCD 3.2 greendelta v2\_18” y “Ecoinvent 3.5 LCIA methods”. Todos estos valores, junto con las estimaciones realizadas por parte de la empresa con respecto a distancias, consumos, dimensiones y tiempos, podrían suponer una limitación para la calidad de los resultados obtenidos.

- Limitaciones debidas a la estimación del tiempo de cada operación y al momento en el que se toma de referencia el factor regional de la tasa de desempleo.

La estimación del impacto social de cada alternativa de disposición también está limitada por los valores de tiempo aportados por parte de las empresas y el momento en el que se toma la tasa de desempleo como factor regional. De manera que, el cálculo aproximado del tiempo destinado a cada operación y el valor del factor regional tomado, podrían suponer también una limitación para la calidad de los resultados obtenidos.

- Limitación debida a la participación de un consultor profesional externo.

El despliegue del MR para la generación del modelo particular integrado y la adaptación del modelo matemático, para cada caso concreto, debe realizarse con la participación de un consultor profesional, externo a la empresa, imposibilitando que puede llevarse a cabo por personal exclusivo de la empresa.

## PARTE VI. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

### Capítulo 16. Conclusiones.

---

Aunque se afirma (y se pretende) que el Marco de Referencia es aplicable a cualquier empresa relacionada con la LI, tan sólo ha podido ser aplicado en dos ejemplos reales. No se conoce con seguridad el grado de adaptación a otras empresas de otros sectores. Sin embargo, la propia estructura del MR está abierta, especialmente mediante la inclusión del Bloque V, para que, en cualquier momento se puedan incorporar las instrucciones y ayuda necesaria para su aplicación a nuevos casos.



# **Capítulo 17. Líneas futuras de investigación**

## 17.1. Principales líneas futuras de investigación

A continuación, se describen las principales líneas de investigación que se proponen a partir de la realización de la presente tesis:

- **Desarrollo de una herramienta informática que facilite el acceso a la información y aporte agilidad a la toma de decisión.**

El Marco de Referencia propuesto combina la utilización de diferente software, recurriendo a distintas bases de datos para captar los valores y aportar la solución escogida. Por ello, se pierde mucho tiempo en la concreción de los valores debido a que los valores económicos, ambientales y sociales provienen de diferentes fuentes. Una vez finalizado el estudio, se considera interesante dotar de agilidad en la toma de decisión, por tanto, una de las líneas futuras se focalizará en desarrollar una sola herramienta o software que pueda combinar toda la información necesaria para aplicar el Marco de Referencia a cualquier ámbito. Asimismo, resultaría interesante que pudiera capturar la información de manera automática para tener los valores lo más actualizados posible.

Además, para poder dotar de mayor agilidad y movilidad en la utilización de la herramienta, podría desarrollarse la utilización de la herramienta bajo una aplicación móvil que facilitara la toma de decisión en cualquier lugar.

- **Ampliación sobre otros factores que determinen la mejor disposición.**

En el presente estudio se han utilizado solamente los factores de la sostenibilidad (económicos, ambientales y sociales) para la elección de la mejor alternativa de disposición. Una próxima línea de investigación estará centrada en analizar otros posibles factores clave que pueden influir sobre la recuperación de valor de los productos, que no se han tenido en cuenta para el desarrollo de la herramienta, como pueden ser:

- **Demanda del mercado**, teniendo en cuenta la demanda del mercado en cuanto a reintroducción de productos o componentes.
- **Facilidad técnica**, teniendo en cuenta las facilidades de desensamblaje de productos y la canibalización de los componentes.

- **Aspectos de salud y seguridad**, teniendo en cuenta aspectos de salud y seguridad para los empleados.

- **Ampliación del ámbito de estudio**

En este trabajo se ha analizado la aplicación del Marco de Referencia sobre dos empresas completamente diferentes. Se plantea como futura línea de investigación la adaptación del Marco de Referencia y la ejecución del proceso de solución en otros sectores o empresas de un mismo sector. Precisamente la aplicación del MR a otros casos supondría una ampliación del contenido del propio en cuanto que ampliaría el repositorio de ejemplos de aplicación (Bloque V) y, por lo tanto, mejoraría su utilidad.

- **Profundización sobre la medición del impacto social**

La dimensión social es la menos estudiada de las dimensiones de la sostenibilidad, no existiendo referencias claras y consensuadas sobre la forma en la que se puede medir el impacto social de las acciones de LI. Por ello, una futura línea de investigación se centrará en profundizar sobre la definición de indicadores que sirvan para medir el impacto social en el ámbito de la LI.

Del conjunto de factores de impacto social encontrados en la literatura, se hizo una simplificación en la tesis para aplicarlos al MR, por ello, otra línea de trabajo posterior será tratar de ampliar el número de factores considerados en el modelo con el fin de evaluar mejor el impacto social de las distintas decisiones de tratamiento de productos.

- **Formación y concienciación sobre sostenibilidad**

Ante la necesidad de reenfocar las líneas de trabajo hacia negocios más sostenibles, basándose en la economía circular y en el máximo aprovechamiento del valor de los productos, se plantea una futura línea de investigación centradas en la creación de proyectos de transferencia a empresas y actividades de formación y concienciación sobre la importancia de la sostenibilidad en general y en las decisiones empresariales en particular, desarrollando proyectos formativos, de gamificación o incluso de especialización, centrando la atención en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Asimismo, se plantea también trabajar sobre proyectos de transferencia de conocimientos sobre sostenibilidad hacia las empresas, con la intención de que se incorporen los factores económicos, ambientales y sociales en la toma de decisiones y se consiga transformar la línea de negocio actual hacia negocios más sostenibles.

- **Convenios con empresas para la aplicación y explotación del MR**

Se plantea la realización de convenios de colaboración con distintas empresas en la que se puede ejecutar y explotar el MR diseñado, consiguiendo así mejorar la gestión de la LI en las empresas y, muy posiblemente, también el diseño del propio MR a partir del conocimiento adquirido y mediante la ampliación del repositorio de ejemplos de aplicación.

# **REFERENCIAS**

- Achillas, C., Aidonis, D., Vlachokostas, C., Moussiopoulos, N., Banias, G., & Triantafillou, D. (2012). A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.004>
- Afia, N. (2010). A stochastic model for forward – reverse logistics network design under risk. *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.09.040>
- Agrawal, S, Singh, R., Resources, Q. M.-, Recycling, C. (2016). Outsourcing decisions in reverse logistics: sustainable balanced scorecard and graph theoretic approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 41–53.
- Agrawal, Saurabh, & Singh, R. K. (2019). Analyzing disposition decisions for sustainable reverse logistics: Triple Bottom Line approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 150, 104448. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104448>
- Agrawal, Saurabh, Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2015, April 1). A literature review and perspectives in reverse logistics. *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>
- Agrawal, Saurabh, Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2016). Disposition decisions in reverse logistics: Graph theory and matrix approach. *Journal of Cleaner Production*, 137, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.045>
- Ahiska, S., Kurtul, E., Conference, R. K.-I. A., & 2013, U. (2013). Determining the value of product substitution for a stochastic manufacturing/remanufacturing system. *Search.Proquest.Com*.
- Alarcón, F., Alemany, M. M. E., Lario, F. C., & Oltra, R. F. (2009). Modelo conceptual para el desarrollo de modelos matemáticos de ayuda a la toma de decisiones en el proceso colaborativo de comprometer pedidos. In *3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, XIII Congreso de Ingeniería de Organización* (pp. 3–12).
- Alarcón, F., Lario, F. C., Boza, A., Perez, D., Vicens, E., & Alemany, M. M. E. (2007). Propuesta de Marco Conceptual para el Modelado del Proceso de Planificación Colaborativa de una Red de Suministro/Distribución (RdS/D). Visión Informacional. In *Congreso de Ingeniería de Organización* (pp. 0873–0882).
- Amin, S. H., & Baki, F. (2017). A facility location model for global closed-loop supply chain network design. *Applied Mathematical Modelling*, 41, 316–330.

<https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.08.030>

- Arena, U., Mastellone, M. ., & Perugini, F. (2003). The environmental performance of alternative solid waste management options: a life cycle assessment study. *Chemical Engineering Journal*, 96(1–3), 207–222. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2003.08.019>
- Ashfari, H., Sharifi, M., ElMekkawy, T. Y., & Peng, Q. (2014). Facility location decisions within integrated forward/reverse logistics under uncertainty. In *Procedia CIRP* (Vol. 17, pp. 606–610). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.092>
- Assamoi, B., & Lawryshyn, Y. (2012). The environmental comparison of landfilling vs. incineration of MSW accounting for waste diversion. *Waste Management*, 32(5), 1019–1030. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.023>
- Audenaert, A., De Cleyn, S. H., & Buyle, M. (2012). LCA of low-energy flats using the Eco-indicator 99 method: Impact of insulation materials. *Energy and Buildings*, 47, 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.028>
- Badri Ahmadi, H., Kusi-Sarpong, S., & Rezaei, J. (2017). Assessing the social sustainability of supply chains using Best Worst Method. *Resources, Conservation and Recycling*, 126, 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.020>
- Bal, A., & Satoglu, S. I. (2018). A goal programming model for sustainable reverse logistics operations planning and an application. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1081–1091. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.104>
- Bandyopadhyay, S., Foo, D. C. Y., & Tan, R. R. (2017). Pursuing Sustainability with Process Integration and Optimization. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 1(1), 1–2. <https://doi.org/10.1007/s41660-017-0006-1>
- Banguera, L. A., Sepúlveda, J. M., Ternero, R., Vargas, M., & Vásquez, Ó. C. (2018). Reverse logistics network design under extended producer responsibility: The case of out-of-use tires in the Gran Santiago city of Chile. *International Journal of Production Economics*, 205, 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.006>
- Barker, T. J., & Zabinsky, Z. B. (2008). Reverse logistics network design: A conceptual framework for decision making. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(4), 250–260. <https://doi.org/10.1080/19397030802591196>
- Barker, T. J., & Zabinsky, Z. B. (2011). A multicriteria decision making model for reverse logistics using analytical hierarchy process. *Omega*, 39(5), 558–573. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2010.12.002>

- Bender, T., Hennes, H., Kalcsics, K., Melo, M. T., & Nickel, S. (2002). Location Software and Interface with GIS and Supply Chain Management. In *Facility Location: Applications and Theory* (pp. 233–274).
- Benedito, E., & Corominas, A. (2010). Optimal manufacturing and remanufacturing capacities of systems with reverse logistics and deterministic uniform demand. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 3(1), 33–53. <https://doi.org/10.3926/jiem.2010.v3n1.p33-53>
- Bicer, Y., Dincer, I., Zamfirescu, C., Vezina, G., & Raso, F. (2016). Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1379–1395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.023>
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299–312. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032>
- Brundtland, G. H. (1989). Global change and our common future. *Environment*, 31(5), 16–43. <https://doi.org/10.1080/00139157.1989.9928941>
- Camero, C., & Sowlati, T. (2014, August 1). Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives - A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.041>
- Cárdenas, I., Beckers, J., & Vanelslander, T. (2017). E-commerce last-mile in Belgium: Developing an external cost delivery index. *Research in Transportation Business and Management*, 24, 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.07.006>
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Ferguson, R. O. (1955). Optimal Estimation of Executive Compensation by Linear Programming. *Management Science*, 1(2), 138–151. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1.2.138>
- Chee Tahir, A., & Darton, R. C. (2010). The Process Analysis Method of selecting indicators to quantify the sustainability performance of a business operation. *Journal of Cleaner Production*, 18(16–17), 1598–1607. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.07.012>
- Chenglin, S., Logistics, Z. X., IEEE, 2008. ICAL 2008., & 2008, U. (2008). Supply planning model for remanufacturing system based on multi-agent technology. *Ieeexplore.Ieee.Org*. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4636175/>
- Cherkaoui, H., Godichaud, M., & Amodeo, L. (2015). Multi-Objective Capacitated Disassembly Scheduling with Lost Sales. In *researchgate.net* (pp. 172–178). <https://doi.org/10.5220/0005231901720178>



- Chileshe, N., Rameezdeen, R., Hosseini, M. R., Martek, I., Li, H. X., & Panjehbashi-Aghdam, P. (2018). Factors driving the implementation of reverse logistics: A quantified model for the construction industry. *Waste Management*, 79, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.013>
- Chinda, T., & Ammarapala, V. (2016). Decision-making on reverse logistics in the construction industry. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 38(1), 7–14. Retrieved from <http://rdo.psu.ac.th/sjstweb/journal/38-1/38-1-2.pdf>
- Chofqi, A., Younsi, A., Lhadi, E. K., Mania, J., Mudry, J., & Veron, A. (2004). Environmental impact of an urban landfill on a coastal aquifer (El Jadida, Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 39(3–5), 509–516. <https://doi.org/10.1016/J.JAFREARSCI.2004.07.013>
- Clift, R., Doig, A., & Finnveden, G. (2000). The application of Life Cycle Assessment to Integrated Solid Waste Management. Part 1 - Methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 78(4), 279–287. <https://doi.org/10.1205/095758200530790>
- Cloquell-Ballester, V. A. V. A., Cloquell-Ballester, V. A. V. A., Monterde-Díaz, R., & Santamarina-Siurana, M. C. (2006). Indicators validation for the improvement of environmental and social impact quantitative assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 26(1), 79–105. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2005.06.002>
- Cohon, J. L., & Marks, D. H. (1975). A review and evaluation of multiobjective programming techniques. *Water Resources Research*, 11(2), 208–220. <https://doi.org/10.1029/WR011i002p00208>
- Consonni, S., Giugliano, M., & Grosso, M. (2005). Alternative strategies for energy recovery from municipal solid waste: Part B: Emission and cost estimates. *Waste Management*, 25(2), 137–148. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2004.09.006>
- Cortés, P., & Alarcón, F. (2018). Identification of reverse logistics decision types from mathematical models. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 11(2), 239–249. <https://doi.org/10.3926/jiem.2530>
- Cuartas Torres, B. A. (2009). *METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE MÚLTIPLES OBJETIVOS BASADA EN AG Y USO DE PREFERENCIAS*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- Darbari, J. D., Agarwal, V., Chaudhary, K., & Jha, P. C. (2015). Multi-criteria decision approach for a sustainable reverse logistics network under fuzzy environment. In *2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)* (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEOM.2015.7093813>

- Das, K., & Chowdhury, A. H. (2012). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.07.010>
- De Brito, M. P., & Dekker, R. (2004). A Framework for Reverse Logistics. In *Reverse Logistics* (pp. 3–27). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-24803-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24803-3_1)
- Deb, K., Sundar, J., Udaya Bhaskara, R. N., & Chaudhuri, S. (2010). Reference Point Based Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 2(3), 273–286. <https://doi.org/10.5019/j.ijcir.2006.67>
- Dehghanian, F., & Mansour, S. (2009). Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(10), 559–570. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2009.04.007>
- Deif, A. M. (2011). A system model for green manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 19(14), 1553–1559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.05.022>
- Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K., van Wassenhove, L. N. (2004). *Reverse Logistics - Quantitative Models for Closed-Loop Supply Chains*.
- Demirel, N. Ö., & Gökçen, H. (2008). A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(11–12), 1197–1206. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1290-7>
- Desport, P., Lardeux, F., Lesaint, D., Liret, A., Di Cairano-Gilfedder, C., & Owusu, G. (2017). Model and combinatorial optimization methods for tactical planning in closed-loop supply chains. In *Proceedings - 2016 IEEE 28th International Conference on Tools with Artificial Intelligence, ICTAI 2016* (pp. 888–895). <https://doi.org/10.1109/ICTAI.2016.0134>
- Devika, K., Jafarian, A., & Nourbakhsh, V. (2014). Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 594–615. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.032>
- Dhib, S., Loukil, T., Addouche, S. A., & Mhamedi, A. El. (2013). Selecting configuration of reverse logistics network using sustainability indicators. *Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), 2013 5th International Conference On*, (2008), 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2013.6552567>
- Dhouib, D. (2013). Fuzzy Macbeth method to analyze alternatives in automobile tire wastes reverse logistics. In *2013 International Conference on Advanced Logistics and Transport*,

ICALT 2013 (pp. 321–326). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAdLT.2013.6568479>

- Dhouib, D. (2014). An extension of MACBETH method for a fuzzy environment to analyze alternatives in reverse logistics for automobile tire wastes. *Omega (United Kingdom)*, 42(1), 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.003>
- Dijkgraaf, E., & Vollebergh, H. R. J. (2004). Burn or bury? A social cost comparison of final waste disposal methods. *Ecological Economics*, 50(3–4), 233–247. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2004.03.029>
- De Rogers, S & Tibben-Lembke, R. (1999). Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices. *Logistics Management*.
- Dreyer, L. C., Niemann, A. L., & Hauschild, M. Z. (2008). Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(4), 191–200. <https://doi.org/10.1007/bf02978471>
- Dumay, J., Guthrie, J., & Farneti, F. (2010). Gri Sustainability Reporting Guidelines For Public And Third Sector Organizations. *Public Management Review*, 12(4), 531–548. <https://doi.org/10.1080/14719037.2010.496266>
- Dutta, P., Mishra, A., Khandelwal, S., & Katthawala, I. (2019). A multiobjective optimization model for sustainable reverse logistics in Indian E-commerce market. *Journal of Cleaner Production*, 119348. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119348>
- Ehrental, J. C. F., & Stölzle, W. (2013). An examination of the causes for retail stockouts. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 43(1), 54–69. <https://doi.org/10.1108/09600031311293255>
- Ekvall, T., Assefa, G., Björklund, A., Eriksson, O., & Finnveden, G. (2007). What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. *Waste Management*, 27(8), 989–996. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2007.02.015>
- El-Fadel, M., Findikakis, A. N., & Leckie, J. O. (1997). Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling. *Journal of Environmental Management*, 50(1), 1–25. <https://doi.org/10.1006/JEMA.1995.0131>
- El Mundo. (2019). Las devoluciones online le pasan factura al comercio: tres de cada 10 productos se “pierden” | Ahorro y Consumo. Retrieved October 2, 2019, from <https://www.elmundo.es/economia/ahorro-y-consumo/2019/01/13/5c389b2b21efa0d0688b46d6.html>
- El Saadany, A. M. A., Jaber, M. M. Y., Saadany, A. El, & Jaber, M. M. Y. (2011). A

- production/remanufacture model with returns' subassemblies managed differently. In *International Journal of Production Economics* (Vol. 133, pp. 119–126). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.08.014>
- El Saadany, A. M. A., Jaber, M. Y., & Bonney, M. (2013). How many times to remanufacture? In *International Journal of Production Economics* (Vol. 143, pp. 598–604). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.11.017>
- Emery, A., Davies, A., Griffiths, A., & Williams, K. (2007). Environmental and economic modelling: A case study of municipal solid waste management scenarios in Wales. *Resources, Conservation and Recycling*, 49(3), 244–263. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2006.03.016>
- Ene, S., & Öztürk, N. (2014). Open Loop Reverse Supply Chain Network Design. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 109, 1110–1115. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.596>
- Erasmus + Programme of the European Union. (2018). Circular Economy in the Furniture Industry : Overview of Current Challenges and competences needs, 1–51.
- Erbao, C., Mingyong, L., & Kai, N. (2008). A Differential Evolution & Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-up and Time Windows. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2), 10576–10581. <https://doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01791>
- Eslava, J. de J. (2003). *Análisis económico-financiero de las decisiones de gestión empresarial*. Retrieved from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=G782j28CNo8C&oi=fnd&pg=PA15&dq=Análisis+económico-financiero+de+las+decisiones+de+gestión+empresarial&ots=0guI05UDKZ&sig=WfPbxb0LVswLOS-CTqnDbbv9n64>
- España, G. de. (2018). España Circular 2030–Estrategia Española de Economía Circular.
- Faccio, M., Persona, A., Sgarbossa, F., & Zanin, G. (2014). Sustainable SC through the complete reprocessing of end-of-life products by manufacturers: A traditional versus social responsibility company perspective. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 359–373. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.03.027>
- Farahani, S., Otieno, W., & Barah, M. (2019). Environmentally friendly disposition decisions for end-of-life electrical and electronic products: The case of computer remanufacture. *Journal of Cleaner Production*, 224, 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.182>

- Feitó-Cespón, M., Sarache, W., Piedra-Jimenez, F., & Cespón-Castro, R. (2017). Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty A case study. *Journal of Cleaner Production*, *151*, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.057>
- Fernández, A., Gil, M., & Torre, P. (2004). Logística inversa y medio ambiente. Retrieved from [http://coruxa.epsig.uniovi.es/~adenso/logistica\\_inversa\\_indice.pdf](http://coruxa.epsig.uniovi.es/~adenso/logistica_inversa_indice.pdf)
- Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R., & Flapper, S. D. P. (2000). A characterisation of logistics networks for product recovery. *Omega*, *28*(6), 653–666. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(00)00022-0)
- Fonseca, M. C., García-Sánchez, Á., Ortega-Mier, M., & Saldanha-da-Gama, F. (2010). A stochastic bi-objective location model for strategic reverse logistics. *TOP*, *18*(1), 158–184. <https://doi.org/10.1007/s11750-009-0107-2>
- Forrest, A., Hilton, M., Ballinger, A., & Whittaker, D. (2017). Circular Economy Opportunities in the Furniture Sector. *European Environmental Bureau (EEB)*, *55*.
- Gan, S. S., Pujawan, I. N., Suparno, & Widodo, B. (2017). Pricing decision for new and remanufactured product in a closed-loop supply chain with separate sales-channel. *International Journal of Production Economics*, *190*, 120–132. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.016>
- Garetti, M., & Taisch, M. (2012). Sustainable manufacturing: Trends and research challenges. *Production Planning and Control*, *23*(2–3), 83–104. <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.591619>
- Genchev, S. E., Glenn Richey, R., & Gabler, C. B. (2011). Evaluating reverse logistics programs: A suggested process formalization. *The International Journal of Logistics Management*, *22*(2), 242–263. <https://doi.org/10.1108/09574091111156578>
- Geyer, R., & Blass, V. D. (2010). The economics of cell phone reuse and recycling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *47*(5–8), 515–525. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2228-z>
- Ginter, P. M., & Starling, J. M. (1978). Reverse Distribution Channels for Recycling. *California Management Review*, *20*(3), 72–82. <https://doi.org/10.2307/41165284>
- Gobierno de España. (2017). PLAN ESTATAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNICA Y DE INNOVACION, 1–55. Retrieved from <papers2://publication/uuid/833191B9-AF6F-41AB-BA8A-B8675AF01D0C>
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009).

- Recipe 2008. *A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level, 1*, (January). Retrieved from [https://sites.google.com/site/lciarecipe/file-cabinet/ReCiPemainreportfinal\\_27-02-2009\\_web.pdf](https://sites.google.com/site/lciarecipe/file-cabinet/ReCiPemainreportfinal_27-02-2009_web.pdf)
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001). The eco-indicator 99: a damage oriented method for life cycle impact assessment, Methodology annex. [https://www.pre-sustainability.com/download/EI99\\_annexe\\_v3.pdf](https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_annexe_v3.pdf); *Pre Consultants*, 1-83 [accessed 17.01.15]. Retrieved from <https://ci.nii.ac.jp/naid/10014712580/>
- Goedkoop, Mark, & Spriensma, R. (1999). Manual Práctico de Ecodiseño. Operativa de implantación en 7 pasos.
- Goedkoop, Mark, & Spriensma, R. (2000). The eco-indicator99: A damage oriented method for life cycle impact assessment: Methodology report. *Pre Consultants*. Retrieved from <https://ci.nii.ac.jp/naid/10014712580/>
- Goldberg D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization \& Learning. Optimization, and Machine Learning*. Addison Wesley Publishing Co. Inc. Retrieved from <https://ci.nii.ac.jp/naid/10000038763/>
- Gomes, C. F. S., Nunes, K. R. A., Helena Xavier, L., Cardoso, R., & Valle, R. (2008). Multicriteria decision making applied to waste recycling in Brazil. *Omega*, 36(3), 395–404. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.07.009>
- González-Torre, P. L., Adenso-Díaz, B., & Artiba, H. (2004). Environmental and reverse logistics policies in European bottling and packaging firms. *International Journal of Production Economics*, 88(1), 95–104. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00181-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00181-6)
- González, B., & Adenso-Díaz, B. (2005). A bill of materials-based approach for end-of-life decision making in design for the environment. *International Journal of Production Research*, 43(10), 2071–2099. <https://doi.org/10.1080/00207540412331333423>
- Govindan, K., Paam, P., & Abtahi, A. R. (2016). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological Indicators*, 67, 753–768. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.017>
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2014). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Govindan, K., & Soleimani, H. (2017). A review of reverse logistics and closed-loop

supply chains: a Journal of Cleaner Production focus. *Journal of Cleaner Production*, 142, 371–384. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.126>

- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- GRI. (2006). Sustainability Reporting Guidelines © 2000-2006. *Environment*. Retrieved from [https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=Global+Reporting+Initiative%2C+2006.+G3+Sustainability+Reporting+Guidelines.+Global+Reporting+Initiative%2C+Amsterdam%2C+The+Netherlands.&btnG=](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Global+Reporting+Initiative%2C+2006.+G3+Sustainability+Reporting+Guidelines.+Global+Reporting+Initiative%2C+Amsterdam%2C+The+Netherlands.&btnG=)
- Gu, W., Wang, C., Dai, S., Wei, L., & Chiang, I. R. (2019). Optimal strategies for reverse logistics network construction: A multi-criteria decision method for Chinese iron and steel industry. *Resources Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.02.008>
- Gu, Y., & Liu, Q. (2013). Research on the application of the internet of things in reverse logistics information management. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 6(4), 963–973.
- Guarnieri, P., e Silva, L. C., & Levino, N. A. (2016). Analysis of electronic waste reverse logistics decisions using Strategic Options Development Analysis methodology: A Brazilian case. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1105–1117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.025>
- Guide, V. D. R., & Li, J. (2010). The potential for cannibalization of new products sales by remanufactured products. *Decision Sciences*, 41(3), 547–572. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2010.00280.x>
- Guiltinan, J., & Nwokoye, N. (1974). Reverse channels for recycling: an analysis of alternatives and public policy implications. *American Marketing Association* .... Retrieved from [https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=.+Reverse+channels+for+recycling%3A+an+analysis+for+alternatives+and+public+policy+implications&btnG=](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=.+Reverse+channels+for+recycling%3A+an+analysis+for+alternatives+and+public+policy+implications&btnG=)
- Gungor, A., & Gupta, S. M. (1999). Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: A survey. *Computers and Industrial Engineering*, 36(4), 811–853. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00167-9)
- Halldórsson, Á., Kotzab, H., & Skjøtt-Larsen, T. (2009). Supply chain management on the crossroad to sustainability: a blessing or a curse? *Logistics Research*, 1(2), 83–94. <https://doi.org/10.1007/s12159-009-0012-y>

- Han, X., Wu, H., Yang, Q., & Shang, J. (2016). Reverse channel selection under remanufacturing risks: Balancing profitability and robustness. *International Journal of Production Economics*, 182, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.013>
- Hanafı, J., Kara, S., & Kaebernick, H. (2008). Reverse logistics strategies for end-of-life products. *The International Journal of Logistics Management*, 19(3), 367–388. <https://doi.org/10.1108/09574090810919206>
- Harraz, N. A., & Galal, N. M. (2011). Design of Sustainable End-of-life Vehicle recovery network in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal*, 2(3–4), 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2011.09.006>
- Hazen, B. T., Cegielski, C., & Hanna, J. B. (2011). Diffusion of green supply chain management: Examining perceived quality of green reverse logistics. *International Journal of Logistics Management*, 22(3), 373–389. <https://doi.org/10.1108/09574091111181372>
- Hazen, B. T., Hall, D. J., & Hanna, J. B. (2012). Reverse logistics disposition decision-making: Developing a decision framework via content analysis. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 42(3), 244–274. <https://doi.org/10.1108/09600031211225954>
- Hernández, J. E., Poler, R., Mula, J., & Lario, F. C. (2011). The Reverse Logistic Process of an Automobile Supply Chain Network Supported by a Collaborative Decision-Making Model. *Group Decision and Negotiation*, 20(1), 79–114. <https://doi.org/10.1007/s10726-010-9205-7>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., ... van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Hula, A., Jalali, K., Hamza, K., Skerlos, S. J., & Saitou, K. (2003). Multi-Criteria Decision-Making for Optimization of Product Disassembly under Multiple Situations. *Environmental Science and Technology*, 37(23), 5303–5313. <https://doi.org/10.1021/es0345423>
- Huscroft, J. R., Hazen, B. T., Hall, D. J., Skipper, J. B., & Hanna, J. B. (2013). Reverse logistics: Past research, current management issues, and future directions. *The International Journal of Logistics Management*, 24(3), 304–327. <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2012-0024>
- Iacovidou, E., Velis, C. A., Purnell, P., Zwirner, O., Brown, A., Hahladakis, J., ... Williams, P. T. (2017). Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review. *Journal of Cleaner Production*.



<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.100>

- Inderfurth, K. (2005). Impact of uncertainties on recovery behavior in a remanufacturing environment. A numerical analysis. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 35(5), 318–336. <https://doi.org/10.1108/09600030510607328>
- ISO. (2010). *ISO/DIS 26000. Guidance on Social Responsibility*.
- Jayaraman, V., Patterson, R., & Rolland, E. (2003). The design of reverse distribution networks: models and solution procedures. *European Journal of Operational*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221702004976>
- John, S. T., Sridharan, R., & Kumar, P. N. R. (2017). Multi-period reverse logistics network design with emission cost. *International Journal of Logistics Management*, 28(1), 127–149. <https://doi.org/10.1108/IJLM-08-2015-0143>
- Jonrinaldi, & Zhang, D. Z. (2010). Optimal integrated production and inventory cycles in a whole green manufacturing supply chain network with coordination. In *The 40th International Conference on Computers & Industrial Engineering* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCIE.2010.5668191>
- Jun, H. B., Cusin, M., Kiritsis, D., & Xirouchakis, P. (2007). A multi-objective evolutionary algorithm for EOL product recovery optimization: Turbocharger case study. *International Journal of Production Research*, 45(18–19), 4573–4594. <https://doi.org/10.1080/00207540701440071>
- Kannan, G., Pokharel, S., & Kumar, P. S. (2009). A hybrid approach using ISM and fuzzy TOPSIS for the selection of reverse logistics provider. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(1), 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.06.004>
- Kasanen, E., Lukka, K., & Siitonen, A. (1993). The constructive approach in management accounting research. *Journal of Management Accounting Research*, (5), 243–264. Retrieved from [https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/183797/mod\\_resource/content/1/Kasanen et al 1993.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/183797/mod_resource/content/1/Kasanen%20et%20al%201993.pdf)
- Keivanpour, S., Mascle, C., & Kadi, D. (2014). A conceptual framework for value chain analysis of end of life aircraft treatment in the context of sustainable development. Retrieved from <http://papers.sae.org/gsdownload/?prodCd=2014-01-2232>
- Khor, J. K. S., & Udin, Z. M. (2011). Impact of reverse logistics product disposition towards business performance in Malaysian E&E companies: A conceptual study. In *Innovation and Knowledge Management: A Global Competitive Advantage - Proceedings of the 16th International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2011*

(Vol. 2, pp. 1089–1098). <https://doi.org/10.5171/2012.699469>

- Kim, S. S. L.-I. A. C., & 2012, U. (2012). Inventory Control in Hybrid Manufacturing System with Fixed Set-up Costs. *Search.Proquest.Com*. Retrieved from <http://search.proquest.com/openview/2caefb82bfb1c14915b443560105e0b2/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51908>
- Kim, K, Song, I., Kim, J., Engineering, B. J.-C. & I., & 2006, U. (2006). Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment. *Elsevier*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835206000945>
- Kim, Kibum, Song, I., Kim, J., & Jeong, B. (2006). Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment. *Computers and Industrial Engineering*, 51(2), 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.02.008>
- Kizilboga, G., Mandil, G., Genevois, M. E., & Zwolinski, P. (2013). Remanufacturing network design modeling: A case of diesel particulate filter. In *Procedia CIRP* (Vol. 11, pp. 163–168). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.07.048>
- Ko, H. J., & Evans, G. W. (2007). A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. *Computers and Operations Research*, 34(2), 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.004>
- Konak, A., Coit, D. W., & Smith, A. E. (2006). Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering and System Safety*, 91(9), 992–1007. <https://doi.org/10.1016/j.res.2005.11.018>
- Kopicki, R., Michael, J., & Legg, L. (1993). Reuse and Recycling — Reverse Logistics Opportunities. *Transportation Journal*, 195, 64–66. <https://doi.org/9789995593834>
- Krikke, H. (n.d.). Impact of closed-loop network configurations on carbon footprints: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344911001443>
- Krikke, H. R., Van Harten, A., & Schuur, P. C. (1998). On a medium term product recovery and disposal strategy for durable assembly products. *International Journal of Production Research*, 36(1), 111–140. <https://doi.org/10.1080/002075498193967>
- Krumwiede, D. W., & Sheu, C. (2002). A model for reverse logistics entry by third-party providers. *Omega*, 30(5), 325–333. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(02\)00049-X](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(02)00049-X)
- Kuik, S. S., Kaihara, T., & Fujii, N. (2016). Product Recovery Configuration Decisions for Achieving Sustainable Manufacturing. In *Procedia CIRP* (Vol. 41, pp. 258–263).

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.195>

- Kumar, S., & Malegeant, P. (2006). Strategic alliance in a closed-loop supply chain, a case of manufacturer and eco-non-profit organization. *Technovation*, 26(10), 1127–1135. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2005.08.002>
- Kushwaha, S., & Bhattacharya, S. (2015). The Impact of Cannibalization on Product Returns for Remanufacturing Under Different Demand Scenarios. *The IUP Journal of Operations Management*, XIV(1), 39–53.
- Kusumastuti, R., Piplani, R., & Lim, G. H. (2004). An approach to design reverse logistics networks for product recovery. *2004 IEEE International Engineering Management Conference (IEEE Cat. No.04CH37574)*, 3, 1239–1243. <https://doi.org/10.1109/IEMC.2004.1408892>
- Labuschagne, C., Brent, A. C., & Erck, Ron P G, V. (2005). Assessing the sustainability performances of industries. *Journal of Cleaner Production*, 13(4), 373–385. [https://doi.org/10.1016/S1574-0714\(06\)01001-3](https://doi.org/10.1016/S1574-0714(06)01001-3)
- Lalmazloumian, M., Abdul-Kader, W., & Ahmadi, M. (2014). A Simulation Model of Economic Production and Remanufacturing System Under Uncertainty. *Proceedings of the 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference*.
- Lambert, S., Riopel, D., & Abdul-Kader, W. (2011). A reverse logistics decisions conceptual framework. *Computers and Industrial Engineering*, 61(3), 561–581. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.04.012>
- Lebreton, B., & Tuma, A. (2006). !!!A quantitative approach to assessing the profitability of car and truck tire remanufacturing.pdf. *International Journal of Production Economics*, 104(2), 639–652.
- Lee, S. G., Lye, S. W., & Khoo, M. K. (2001). A multi-objective methodology for evaluating product end-of-life options and disassembly. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(2), 148–156. <https://doi.org/10.1007/s001700170086>
- Lehtiranta, L., Junnonen, J.-M., Kärnä, S., & Pekuri, L. (2015). The Constructive Research Approach: Problem Solving for Complex Projects. In *Designs, Methods and Practices for Research of Project Management* (p. 520).
- Li, J., González, M., & Zhu, Y. (2009). A hybrid simulation optimization method for production planning of dedicated remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 117(2), 286–301. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.11.005>

- Liu, L., Wang, Z., Xu, L., Hong, X., & Govindan, K. (2017). Collection effort and reverse channel choices in a closed-loop supply chain. *Journal of Cleaner Production*, *144*, 492–500. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.126>
- Lukka, K. (2000). The key issues of applying the constructive approach to field research. *Reponen, T*, 113–128.
- Lukka, K. (2005). Approaches to case research in management accounting: the nature of empirical intervention and theory linkage. *Accounting in Scandinavia—The Northern Lights, Liber & Copenhagen Business School Press, Kristianstad, SW*, *99*, 375.
- Mabert, V. A., & Venkataramanan, M. A. (1998). Special Research Focus on Supply Chain Linkages: Challenges for Design and Management in the 21st Century. *Decision Sciences*, *29*(3), 537–552. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.1998.tb01353.x>
- Makarova, I., Shubenkova, K., & Pashkevich, A. (2018). The Concept of the Decision Support System to Plan the Reverse Logistics in Automotive Industry. In *2018 26th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM 2018* (pp. 76–81). IEEE. <https://doi.org/10.23919/SOFTCOM.2018.8555760>
- Man, J. (2010). Research on the collection policy of integrated supply chain based on remanufacture. In *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, ICICTA 2010* (Vol. 3, pp. 144–147). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2010.520>
- Mangun, D., & Thurston, D. L. (2002). Incorporating component reuse, remanufacture, and recycle into product portfolio design. *IEEE Transactions on Engineering Management*, *49*(4), 479–490. <https://doi.org/10.1109/TEM.2002.807292>
- Mardle, S., & Miettinen, K. M. (2006). Nonlinear Multiobjective Optimization. *The Journal of the Operational Research Society*, *51*(2), 246. <https://doi.org/10.2307/254267>
- Marglin, J. A. (1967). *Public Investment Criteria*. MIT Press. Cambridge,. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315737126>
- Marin, V. (2015). *Mundo FESC*. *Revista Mundo FESC* (Vol. 5). Retrieved from <http://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/76>
- Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management - A review. *European Journal of Operational Research*, *196*(2), 401–412. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.007>
- Méndez Babey, M. (2008). *Tesis Doctoral Algoritmos Evolutivos y Preferencias del Decisor*

- Mitra, S. (2007). Revenue management for remanufactured products. *Omega*, 35(5), 553–562. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2005.10.003>
- Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., & Barbosa-Povoa, A. P. (2015). Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning. *Journal of Cleaner Production*, 105, 14–27. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.07.052>
- Nabavi-Pelesaraei, A., Bayat, R., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Afrasyabi, H., & Chau, K. wing. (2017). Modeling of energy consumption and environmental life cycle assessment for incineration and landfill systems of municipal solid waste management - A case study in Tehran Metropolis of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 148, 427–440. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.172>
- Neilimo, K. & Näsi, J. (1980). Nomoteettinen tutkimusote ja suomalainen yrityksen taloustiede. Tutkimus positivismiin soveltamisesta. *Tampere, Tampereen Yliopisto*, 145.
- Ness, B., Urbel-Piirsalu, E., Anderberg, S., & Olsson, L. (2007). Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological Economics*, 60(3), 498–508. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2006.07.023>
- Niknejad, A., & Petrovic, D. (2014). Optimisation of integrated reverse logistics networks with different product recovery routes. *European Journal of Operational Research*, 238(1), 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.03.034>
- Nikolaou, I. E., Evangelinos, K. I., & Allan, S. (2013). A reverse logistics social responsibility evaluation framework based on the triple bottom line approach. *Journal of Cleaner Production*, 56, 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.009>
- Olivera, A. (2015). Desarrollo teórico de técnicas meta-heurísticas para resolver problemas de optimización“ TN”(Transit Networks) en entornos dinámicos. Retrieved from <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/1979>
- Ortegon, K., Nies, L. F., & Sutherland, J. W. (2013). Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 39, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.022>
- Özkır, V., & Başlıgil, H. (2013). Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment. *Journal of Cleaner Production*, 41, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.013>
- Pan, S., Chen, C., & Zhong, R. Y. (2015). A crowdsourcing solution to collect e-commerce

- reverse flows in metropolitan areas. In *IFAC-PapersOnLine* (Vol. 28, pp. 1984–1989).  
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.379>
- Panagiotidou, S., Nenes, G., Zikopoulos, C., & Tagaras, G. (2017). Joint optimization of manufacturing/remanufacturing lot sizes under imperfect information on returns quality. *European Journal of Operational Research*, 258(2), 537–551.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.08.044>
- Parlament, E. (2013). /UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 20 de noviembre de 2013 relativa al Programa General de Acción de la, 171–200. Retrieved from  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013D1386&from=EN>
- Pati, R. K., Vrat, P., & Kumar, P. (2008). A goal programming model for paper recycling system. *Omega*, 36(3), 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.04.014>
- Pedram, A., Yusoff, N. Bin, Udoncy, O. E., Mahat, A. B., Pedram, P., & Babalola, A. (2017). Integrated forward and reverse supply chain: A tire case study. *Waste Management*, 60, 460–470. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.029>
- Pennington, D. W., Potting, J., Finnveden, G., Lindeijer, E., Jolliet, O., Rydberg, T., & Rebitzer, G. (2004, July 1). Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice. *Environment International*. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.12.009>
- Pérez Aparicio, R., & Saiz Rodríguez, L. (2018). Reciclado de neumáticos: transformación de un residuo en un recurso. *Revista de Plásticos Modernos*, 115, 11–18. Retrieved from  
<https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/04/reciclado-de-neumaticos-transformacion-de-un-residuo-en-un-recurso.pdf>
- Pieroni, M. P. P., McAloone, T. C., & Pigosso, D. C. A. (2019). Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.036>
- Piplani, R., & Saraswat, A. (2012). Robust optimisation approach to the design of service networks for reverse logistics. *International Journal of Production Research*, 50(5), 1424–1437. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.571942>
- Pishvae, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 206, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2012.04.010>
- Pochampally, K. K., & Gupta, S. M. (2004). A business-mapping approach to multi-criteria group

- selection of collection centers and recovery facilities. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2004. Conference Record. 2004*, 249–254. <https://doi.org/10.1109/ISEE.2004.1299724>
- Pohlen, T. L., & Farris, M. T. (1992). Reverse Logistics in Plastics Recycling. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 22(7), 35–47. <https://doi.org/10.1108/09600039210022051>
- Pokharel, S., & Mutha, A. (2009). Perspectives in reverse logistics: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(4), 175–182. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.11.006>
- Poole, K. (2003). Seizing the potential of the service supply chain. *SUPPLY CHAIN MANAGEMENT REVIEW*, V. 7, NO. 4
- Prajapati, H., Kant, R., & Shankar, R. (2019). Bequeath life to death: State-of-art review on reverse logistics. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.187>
- Prakash, C., & Barua, M. K. (2016). A combined MCDM approach for evaluation and selection of third-party reverse logistics partner for Indian electronics industry. *Sustainable Production and Consumption*, 7, 66–78. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.04.001>
- Pushkar, S. (2013). Using Eco-Indicator 99 to Evaluate Building Technologies under Life Cycle Assessment Uncertainties. *Journal of Architectural Engineering*, 20(2), 04013010. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ae.1943-5568.0000143](https://doi.org/10.1061/(asce)ae.1943-5568.0000143)
- Qian, X., Han, Y., Da, Q., & Stokes, P. (2012). Reverse logistics network design model based on e-commerce. *International Journal of Organizational Analysis*, 20(2), 251–261. <https://doi.org/10.1108/19348831211227864>
- Qiang, Q., Ke, K., Anderson, T., & Dong, J. (2013). The closed-loop supply chain network with competition, distribution channel investment, and uncertainties. *Omega (United Kingdom)*, 41(2), 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2011.08.011>
- Rahimi, M., Baboli, A., & Rekik, Y. (2016). Sustainable Inventory Routing Problem for Perishable Products by Considering Reverse Logistic. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 949–954. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.898>
- Rajeev, A., Pati, R. K., Padhi, S. S., & Govindan, K. (2017, September 20). Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.026>

- Ramkumar, N., Subramanian, P., Narendran, T. T., & Ganesh, K. (2011, December 1). Erratum to “A genetic algorithm approach for solving a closed loop supply chain model: A case of battery recycling” [Appl. Math. Modell. 34 (2010) 655-670]. *Applied Mathematical Modelling*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.05.026>
- Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., & Barbosa-Póvoa, A. P. (2014). Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns. *Omega (United Kingdom)*, 48, 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.11.006>
- Rautiainen, A., Sippola, K., & Mättö, T. (2017). Perspectives on relevance: The relevance test in the constructive research approach. *Management Accounting Research*, 34, 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.mar.2016.07.001>
- Ravi, V., Shankar, R., & Tiwari, M. (2005). Analyzing alternatives in reverse logistics for end-of-life computers: ANP and balanced scorecard approach. *Computers & Industrial Engineering*.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., ... Pennington, D. W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701–720. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2003.11.005>
- Rezapour, S., Farahani, R. Z., Fahimnia, B., Govindan, K., & Mansouri, Y. (2015). Competitive closed-loop supply chain network design with price-dependent demands. *Journal of Cleaner Production*, 93, 251–272. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.095>
- Robinson, B. H. (2009). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of The Total Environment*, 408(2), 183–191. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2009.09.044>
- Rubio Lacoba, S. (2003). El sistema de logística inversa en la empresa: análisis y aplicaciones, 299.
- Saadany, A. M. A. El, & Jaber, M. Y. (2010). Computers & Industrial Engineering A production / remanufacturing inventory model with price and quality dependant return rate. *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 352–362. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.01.017>
- Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1063–1077. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.032>
- Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2010). Simultaneous design and



- planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203(2), 336–349.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.08.002>
- Salema, M. I., Póvoa, A. P. B. B., & Novais, A. Q. (2006). A warehouse-based design model for reverse logistics. *Journal of the Operational Research Society*, 57(6), 615–629.  
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602035>
- Sangwan, K. S. (2017). Key Activities, Decision Variables and Performance Indicators of Reverse Logistics. In *Procedia CIRP* (Vol. 61, pp. 257–262). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.185>
- Sarkis, J., Helms, M. M., & Hervani, A. A. (2010). Reverse logistics and social sustainability. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 17(6), 337–354.  
<https://doi.org/10.1002/csr.220>
- Sasikumar, P., Kannan, G., Advanced, A. H.-T. I. J. of, & 2010, U. (2010). A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery—a case of truck tire remanufacturing. *Springer*. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-009-2470-4>
- Schmidt, G., & Wilhelm, W. E. (2000). Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: A review and discussion of modelling issues. *International Journal of Production Research*, 38(7), 1501–1523.  
<https://doi.org/10.1080/002075400188690>
- Setaputra, R., & Mukhopadhyay, S. K. (2010). A framework for research in reverse logistics. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 7(1), 19–55.  
<https://doi.org/10.1504/IJLSM.2010.033889>
- Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. In *Decision Support Systems* (Vol. 54, pp. 1513–1520). North-Holland.  
<https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.053>
- Shaharudin, M. R., Govindan, K., Zailani, S., Tan, K. C., & Iranmanesh, M. (2017). Product return management: Linking product returns, closed-loop supply chain activities and the effectiveness of the reverse supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1144–1156.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.133>
- Sheu, J. B., Chou, Y. H., & Hu, C. C. (2005). An integrated logistics operational model for green-supply chain management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(4), 287–313. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2004.07.001>
- Shi, J., Zhang, G., & Sha, J. (2011). Optimal production planning for a multi-product closed loop

- system with uncertain demand and return. *Computers and Operations Research*, 38(3), 641–650. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2010.08.008>
- Signus. (2017). Memoria anual 2017, CPF. Retrieved from <https://www.signus.es/memoria2017/>
- Signus. (2018). *MEMORIA ANUAL 2018*. Retrieved from <https://www.signus.es/memoria2018/>
- Singh, R. K., Rastogi, S., & Aggarwal, M. (2016). Analyzing the factors for implementation of green supply chain management. *Competitiveness Review*, 26(3), 246–264. <https://doi.org/10.1108/CR-06-2015-0045>
- Singh, Rajesh Kumar, & Agrawal, S. (2018). Analyzing disposition strategies in reverse supply chains: fuzzy TOPSIS approach. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 29(3), 427–443. <https://doi.org/10.1108/MEQ-12-2017-0177>
- Smith, R., Poveda, G., Mesa, O., Valencia, D., Dyner, I., & Jaramillo, P. (2000). *Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre*. Universidad Nacional de Colombia (Vol. 1).
- Souza, G. C. (2013). Closed-Loop Supply Chains: A Critical Review, and Future Research\*. *Decision Sciences*, 44(1), 7–38. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2012.00394.x>
- Soysal, M. (2016). Closed-loop Inventory Routing Problem for returnable transport items. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.07.001>
- Srivastava, S. K. (2008). Network design for reverse logistics. *Special Issue on Logistics: New Perspectives and Challenges*, 36(4), 535–548. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2006.11.012>
- Staikos, T., & Rahimifard, S. (2007). A decision-making model for waste management in the footwear industry. *International Journal of Production Research*, 45(18–19), 4403–4422. <https://doi.org/10.1080/00207540701450187>
- Stankeric, O. (2016). Comparative Analysis of Reverse Logistics Activities and Incineration for Greening Waste Management. Retrieved from <https://zir.nsk.hr/islandora/object/fpz%3A643>
- Stark, R., Seliger, G., & Bonvoisin, J. (2017). *Sustainable manufacturing : challenges, solutions and implementation perspectives*. Retrieved from [https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=Sustainable+Manufacturing+Challenges%2C+Solutions+and+Implementation+Perspectives&btnG=](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Sustainable+Manufacturing+Challenges%2C+Solutions+and+Implementation+Perspectives&btnG=)
- Steneck, D. W., & Sarin, S. C. (2013). Pricing and production planning for reverse supply chain: A review. *International Journal of Production Research*.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2013.836780>

Stock, J. R. (1992). Reverse logistics: White paper. *Council of Logistics Management*. Retrieved from

[https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as\\_sdt=0%2C5&q=Reverse+Logistics.+Council+of+Logistics+Management+stock+1992&btnG=](https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Reverse+Logistics.+Council+of+Logistics+Management+stock+1992&btnG=)

Taleizadeh, A. A., Haghghi, F., & Niaki, S. T. A. (2019). Modeling and solving a sustainable closed loop supply chain problem with pricing decisions and discounts on returned products. *Journal of Cleaner Production*, 207, 163–181. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.198>

Tam, W. Y. V., Le, K. N., Tran, C. N. N., & Wang, J. Y. (2016). A review on contemporary computational programs for Building's life-cycle energy consumption and greenhouse-gas emissions assessment: An empirical study in Australia. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4220–4230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.130>

Tang, C. S., & Zhou, S. (2012, December 16). Research advances in environmentally and socially sustainable operations. *European Journal of Operational Research*. North-Holland. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.07.030>

Teunter, R. H. (2006). Determining optimal disassembly and recovery strategies. *Omega*, 34(6), 533–537. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.01.014>

Thierry, Martijn and Salomon, Marc and Nunen, Jo Van and Wassenhove, L. Van. (1995). Strategic issues in product recovery management. *Long Range Planning*, 28(3), 120. [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(95\)91628-8](https://doi.org/10.1016/0024-6301(95)91628-8)

Tibben-Lembke, R. S., & Rogers, D. S. (2002). Differences between forward and reverse logistics in a retail environment. *Supply Chain Management: An International Journal*, 7(5), 271–282. <https://doi.org/10.1108/13598540210447719>

Torretta, V., Rada, E. C., Ragazzi, M., Trulli, E., Istrate, I. A., & Cioca, L. I. (2015). Treatment and disposal of tyres: Two EU approaches. A review. *Waste Management*, 45, 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.018>

Tsai, W.-H., & Hung, S.-J. (2009). Treatment and recycling system optimisation with activity-based costing in WEEE reverse logistics management: an environmental supply chain perspective. *International Journal of Production Research*, 47(19), 5391–5420. <https://doi.org/10.1080/00207540801927183>

Vahabzadeh, A. H., Asiaei, A., & Zailani, S. (2015). Green decision-making model in reverse logistics using FUZZY-VIKOR method (Reprinted from Resources, Conservation and

- Recycling, vol 103, pg 125-138, 2015). *Resources Conservation and Recycling*, 104, 334–347. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.028>
- Verdad, L. (2019). El oscuro y desconocido negocio de devolver las compras por internet | La Verdad. Retrieved October 4, 2019, from <https://www.laverdad.es/sociedad/compras-vuelta-20190205114915-ntvo.html>
- Veritas, B. (2009). Logística integral. Retrieved from [https://scholar.google.es/scholar?cluster=17820554731072962250&hl=es&as\\_sdt=2005&sciodt=0,5](https://scholar.google.es/scholar?cluster=17820554731072962250&hl=es&as_sdt=2005&sciodt=0,5)
- Vidal, C. J., & Goetschalckx, M. (1997). Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98(1), 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)80080-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)80080-X)
- Wadhwa, S., Madaan, J., & Chan, F. T. S. (2009). Flexible decision modeling of reverse logistics system: A value adding MCDM approach for alternative selection. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(2), 460–469. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2008.01.006>
- Wang, L., Goh, M., Ding, R., & Mishra, V. K. (2018). Improved Simulated Annealing Based Network Model for E-Recycling Reverse Logistics Decisions under Uncertainty. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2018/4390480>
- Wee Kwan Tan, A., & Kumar, A. (2006). A decision-making model for reverse logistics in the computer industry. *The International Journal of Logistics Management*, 17(3), 331–354. <https://doi.org/10.1108/09574090610717518>
- Wei, L., & Gu, W. (2015). Decision-making on reverse logistics for manufacturers: An evolutionary game theory perspective. In *2015 International Conference on Logistics, Informatics and Service Science, LISS 2015* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/LISS.2015.7369638>
- Wikner, J., & Tang, O. (2008). A structural framework for closed-loop supply chains. *The International Journal of Logistics Management*, 19(3), 344–366. <https://doi.org/10.1108/09574090810919198>
- Xanthopoulos, A., & Iakovou, E. (2009). On the optimal design of the disassembly and recovery processes. *Waste Management*, 29(5), 1702–1711. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.009>
- Xu, X., Wu, X., & Guo, W. (2011). Applications of IoT to Reverse Supply Chain. In *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), 2011 7th International Conference on* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/wicom.2011.6040568>

- Yang, F., Hu, P., Zhao, F., & Hu, C. (2015). Customer returns model in a dual-channel supply chain. *Journal of Modelling in Management*, 10(3), 360–379. <https://doi.org/10.1108/JM2-03-2015-0014>
- Yu, H., & Solvang, W. D. (2018). A new two-stage stochastic model for reverse logistics network design under government subsidy and low-carbon emission requirement. In *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (Vol. 2017-Decem, pp. 90–94). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8289857>
- Yunfeng, M., & Zhonghua, P. (2016). Research on recovery model of the fourth party logistics considering government subsidy. In *2016 13th International Conference on Service Systems and Service Management, ICSSSM 2016* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2016.7538480>
- Zadeh, L. (1963). Optimality and non-scalar-valued performance criteria. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 8(1), 59–60. Retrieved from <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1105511/>
- Zeballos, L. J., Gomes, M. I., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2012). Addressing the uncertain quality and quantity of returns in closed-loop supply chains. *Computers and Chemical Engineering*, 47, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.06.034>
- Zeleny, M. (1973). Compromise Programming, Multiple Criteria Decision Making. *Multiple Criteria Decision Making*. University of South Carolina Press, Columbia, 263–301.
- Zhang, X. Le, Potter, A., & Xiao, H. J. (2008). A research to uncertainty in reverse logistics decision making. In *Proceedings of the International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII 2008* (Vol. 1, pp. 195–198). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIII.2008.50>
- Zhang, Y., & Feng, Y. (2007). A selection approach of reverse logistics provider based on fuzzy AHP. In *Proceedings - Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2007* (Vol. 3, pp. 479–482). <https://doi.org/10.1109/FSKD.2007.119>
- Ziout, A., Azab, A., & Atwan, M. (2014). A holistic approach for decision on selection of end-of-life products recovery options. *Journal of Cleaner Production*, 65, 497–516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.001>
- Zuidwijk, R., & Krikke, H. (2008). Strategic response to EEE returns: Product eco-design or new recovery processes? *European Journal of Operational Research*, 191(3), 1206–1222. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.004>

