



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

## **TRABAJO FIN DE MÁSTER DE INGENIERÍA AVANZADA DE PRODUCCIÓN, LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

### **ESTADO DEL ARTE DE LA GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO INVERSA CON INCERTIDUMBRE Y MODELO DE SIMULACIÓN APLICADO AL SECTOR DE LA TELEFONÍA MÓVIL EN ESPAÑA**

AUTOR: NÚRIA FERNÁNDEZ LÓPEZ

TUTOR: PEDRO GÓMEZ GASQUET

Curso Académico: 2019-2020





## Resumen

En los últimos años, el mundo ha sufrido el auge de la tecnología y los electrodomésticos, llenando todos los hogares de aparatos eléctricos y electrónicos. El problema es que estos aparatos al final de su vida útil se suelen desechar de manera incorrecta, provocando grandes cantidades de residuos que cuando se degradan perjudican al medioambiente. La logística inversa pretende recuperar todos aquellos productos que una vez hemos utilizado desechamos, con el fin de reducir el impacto medioambiental.

Para 2020 se prevé que se generen 50 millones de toneladas métricas en residuos eléctricos y electrónicos en el mundo, esto supone un gran impacto al medioambiente debido a las bajas tasas de recogida, que provocan que los desechos acaben en vertederos o se eliminen de manera incorrecta, convirtiéndose en un peligro para el ecosistema.

Dentro de este tipo de aparatos eléctricos se encuentran los teléfonos móviles. En España los abonos telefónicos ya superan a la población total, de manera que el 13% de la población tendría un segundo aparato móvil. Al hecho de que más del 80% de la población disponga de un móvil se suma que España es uno de los países del mundo donde antes decidimos cambiar de modelo, siendo así el ciclo de vida del producto inferior al que debería. Todo esto supone un gran problema, ya que al año desechamos más de 20 millones de móviles y sólo alrededor del 35% de ellos se reciclan, por lo que millones de móviles terminan en vertederos donde se pierden los materiales en lugar de reutilizarlos.

En este trabajo se pretende dar una solución a este problema, mediante el diseño de un modelo de simulación que muestre las posibilidades de recuperación de teléfonos móviles en España y su reincorporación a la cadena de suministro directa, con el fin de darle una segunda vida a los productos, componentes y materiales.





## Summary

In recent years, the world has seen a boom in technology and appliances, filling every home with electrical and electronic gadgets. The problem is that these devices at the end of their useful life are often incorrectly disposable, causing large amounts of waste that, when degraded, harm the environment. Reverse logistics aims to recover all those products that we have once discarded, to reduce the environmental impact.

By 2020, it is specified that 50 million metric tons of electrical and electronic waste are generated in the world, this has a great impact on the environment due to low collection rates, which cause waste to end up in landfills or be disposed of incorrectly, becoming a danger to the ecosystem.

Within this type of electrical equipment are mobile phones. In Spain, telephone subscriptions already exceed the total population, so that 13% of the affected population on a second mobile device. To the fact that more than 80% of the available population of a mobile phone is added that Spain is one of the countries in the world where we decided to change the model before, thus being the life cycle of the product less than it should. All this is a big problem, since every year we discard more than 20 million mobiles and only around 35% of them are recycled, so millions of mobiles end up in landfills where materials are lost instead of reusing them.

This work aims to provide a solution to this problem, by designing a simulation model that shows the possibilities of recovery of mobile phones in Spain and their reincorporation into the direct supply chain, in order to receive a second life a products, components and materials.





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

## Agradecimientos

A Miguel, por apoyarme.  
A mi madre, por estar siempre ahí.  
A Pedro, por guiarme.  
Y a ti, por leerme.







## Contenido

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	11
ÍNDICE DE TABLAS .....	12
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Justificación y objeto del trabajo .....	14
1.2. Objetivos del trabajo.....	14
1.3. Metodología y estructura del trabajo .....	15
2. ESTADO DEL ARTE .....	16
2.1. Gestión de pedidos.....	16
2.2. Gestión de pedidos en cadenas de suministro inversas .....	17
2.3. Gestión de pedidos en cadenas de suministro inversas con incertidumbre .....	19
2.3.1. Recolección de materiales.....	19
2.3.2. Refinamiento de los materiales .....	20
2.3.3. Estudio descriptivo .....	20
2.3.4. Selección de categorías .....	22
2.3.5. Análisis categórico.....	25
2.3.6. Resultados .....	33
2.4. Conclusiones.....	37
3. CASO DE ESTUDIO .....	39
3.1. Gestión y normativa de los RAEE .....	39
3.2. El sector móvil en España.....	41
3.3. Restricciones del problema.....	45
3.4. Funcionamiento esperado del modelo .....	46
3.5. Conclusiones.....	47
4. DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN .....	48
4.1. Descripción de la cadena de suministro a simular .....	48
4.2. Objetivos de la simulación .....	49
4.3. Modelo de simulación.....	50
4.3.1. Diagrama causal .....	51
4.3.2. Diagrama de flujos obtenido a través de VenSim .....	58
4.4. Evaluación de los resultados de la simulación .....	62



4.4.1.	Supuesto 1.....	62
4.4.2.	Supuesto 2.....	72
4.4.3.	Supuesto 3.....	75
4.5.	Validación del modelo.....	78
4.6.	Mejoras del modelo .....	80
4.7.	Conclusiones del modelo .....	82
5.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	88
	ANEXOS .....	94



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: <i>Flujo básico de los procesos tradicionales y los relacionados por la logística inversa. Fuente: (Govindan &amp; Soleimani, 2017)</i> .....	18
Ilustración 2: <i>Fases del ciclo de vida de los AEE y escenarios de la gestión de RAEE. Fuente: (Baldé; C. P.; Forti; Gray; Kuehr; P.; R.; Stegmann; V., 2017).</i> .....	41
Ilustración 3: <i>Cadena de suministro de circuito cerrado. Fuente: (Baldé; C. P.; Forti; Gray; Kuehr; P.; R.; Stegmann; V., 2017)</i> .....	48
Ilustración 4: <i>Representación gráfica de los 27 escenarios finales posibles, mediante la combinación de los 3 supuestos, donde queda señalado en azul el escenario utilizado como base.</i> .....	50
Ilustración 5: <i>Diagrama causal tipo sobre una cadena de suministro directa e inversa. Fuente: (Patroklos Georgiadis &amp; Vlachos, 2004).</i> .....	52
Ilustración 6: <i>Diagrama causal de la cadena de suministro de bucle cerrado de los teléfonos móviles en España.</i> .....	54
Ilustración 7: <i>Diagrama causal de la cadena de suministro de bucle cerrado de los teléfonos móviles, señalización del itinerario de los materiales mediante un código de colores.</i> .....	56
Ilustración 8: <i>Diagrama de flujos en VenSim del modelo de la cadena de suministro de bucle cerrado de los teléfonos móviles.</i> .....	61



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Resultados de la búsqueda bibliográfica en las bases de datos.</i> .....	20
Tabla 2: <i>Clasificación de las categorías donde se van a analizar los diferentes artículos.</i> .....	25
Tabla 3: <i>Ventajas e inconvenientes de los modelos matemáticos y de simulación.</i> .....	33
Tabla 4: <i>Tabla resumen del estado del arte modelos matemáticos.</i> .....	34
Tabla 5: <i>Tabla resumen del estado del arte modelos de simulación.</i> .....	35
Tabla 6: <i>Materiales tóxicos de los RAEE. Fuente:(Pascual, 2019)</i> .....	40
Tabla 7: <i>Número de abono de teléfonos móviles y estimación de los abonos futuros. Fuente: (ITU, 2020)</i> .....	42
Tabla 8: <i>Ciclo de vida medio en meses de los móviles según el país entre 2013 y 2015. Fuente: (Kantar Worldpanel &amp; Guenveur, 2017)</i> .....	42
Tabla 9: <i>Cantidad de material y valor por móvil. Fuente: (Geyer &amp; Blass, 2010).</i> .....	43
Tabla 10: <i>Generación y recogida de RAEE según continente. Fuente: (Baldé; C. P.; Forti; Gray; Kuehr; P.; R.; Stegmann; V., 2017)</i> .....	45
Tabla 11: <i>Valores de las variables de stock que corresponden al modelo base.</i> .....	58
Tabla 12: <i>Valores aplicados a las variables que corresponden a porcentajes para el modelo base.</i> .....	59
Tabla 13: <i>Valores medios de la cantidad y el valor de los metales por unidad de producto.</i> .....	62
Tabla 14: <i>Valor y número de componentes según el modelo de móvil. Fuente: ("Componentes Móvil - Tienda online de repuestos de telefonía," 2020).</i> .....	63
Tabla 15: <i>Parámetros de costes e ingresos por unidad de teléfono móvil según el escenario planteado.</i> .....	64
Tabla 16: <i>Producción y ventas de la cadena directa en los 3 escenarios.</i> .....	74
Tabla 17: <i>Simulaciones variando los porcentajes de las variables de reutilización y remanufactura.</i> .....	75
Tabla 18: <i>Variables de stock del modelo en VenSim.</i> .....	94
Tabla 19: <i>Variables de flujo del modelo en VenSim.</i> .....	95
Tabla 20: <i>Variables auxiliares del modelo en VenSim.</i> .....	98



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: <i>Número de publicaciones por año.</i> .....	21
Gráfico 2: <i>Número de publicaciones por revista.</i> .....	22
Gráfico 3: <i>Tipos de incertidumbre presentes en los modelos matemáticos.</i> .....	28
Gráfico 4: <i>Programas utilizados para realizar el diagrama de flujos.</i> .....	30
Gráfico 5: <i>Factores de incertidumbre considerados en los modelos dinámicos.</i> .....	31
Gráfico 6: <i>Cantidad de productos recuperados, aptos y no aptos para remanufactura, en el escenario realista.</i> .....	64
Gráfico 7: <i>Cantidad de componentes aptos para remanufactura y componentes que reciben una segunda revisión, en el escenario realista.</i> .....	65
Gráfico 8: <i>Cantidad de materiales reciclados según el tipo de metal, en el Escenario 1,2,1.</i> .....	66
Gráfico 9: <i>Costes generados por el funcionamiento de la cadena de suministro inversa, aplicando los valores del Escenario 1,2,1.</i> .....	67
Gráfico 10: <i>Ingresos generados por el funcionamiento de la cadena de suministro inversa, aplicando los valores del Escenario 1,2,1.</i> .....	68
Gráfico 11: <i>Ingresos generados por la venta o reutilización de los metales recuperados en el proceso de reciclaje, aplicando los valores del Escenario 1,2,1.</i> .....	68
Gráfico 12: <i>Beneficios generados por el funcionamiento de la cadena de suministro inversa, aplicando los valores del Escenario 1,2,1.</i> .....	69
Gráfico 13: <i>Beneficios generados por el funcionamiento de la cadena de suministro inversa, aplicando los valores del Escenario 2,2,1.</i> .....	70
Gráfico 14: <i>Beneficios generados por el funcionamiento de la cadena de suministro inversa, aplicando los valores del Escenario 3,2,1.</i> .....	71
Gráfico 15: <i>Comparativa de los beneficios obtenidos en los 3 escenarios del Supuesto 1.</i> .....	71
Gráfico 16: <i>Evolución del volumen de productos recolectados en el Escenario 1,1,1.</i> .....	72
Gráfico 17: <i>Evolución del volumen de productos recolectados en el Escenario 1,2,1.</i> .....	73
Gráfico 18: <i>Evolución del volumen de productos recolectados en el Escenario 1,3,1.</i> .....	73
Gráfico 19: <i>Volumen de residuos no reciclados según el nivel de aplicación de las políticas medioambientales.</i> .....	74
Gráfico 20: <i>Margen de beneficio de la cadena según la combinación de escenarios.</i> .....	75
Gráfico 21: <i>Tasa de reciclaje en el Escenario 1 realista, efectuando las 3 simulaciones.</i> .....	76
Gráfico 22: <i>Tasa de producción de producto en el Escenario 1 realista, efectuando las 3 simulaciones.</i> .....	76
Gráfico 23: <i>Evolución de la demanda acumulada según la simulación procesada.</i> .....	77
Gráfico 24: <i>Beneficios obtenidos para cada simulación, según la variación de los porcentajes.</i> .....	77
Gráfico 25: <i>Tasa de recolección en condiciones extremas, sin demanda (CE1) y sin desechado (CE2).</i> .....	79
Gráfico 26: <i>Tasa de componentes remanufacturados con y sin límite de capacidad.</i> .....	80
Gráfico 27: <i>Variación de la tasa de reciclaje según si existe o no límite de capacidad para remanufactura de componentes.</i> .....	81
Gráfico 28: <i>Beneficios de la cadena para la simulación 1, del Escenario 1 realista, con y sin límite de capacidad de remanufactura de componentes.</i> .....	81



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Justificación y objeto del trabajo

En los últimos años, la logística inversa se ha convertido en un campo de importancia para todas las organizaciones debido a las crecientes preocupaciones ambientales, la legislación, la responsabilidad social corporativa y la competitividad sostenible. La logística inversa se refiere pues, a la secuencia de actividades requeridas para recolectar el producto usado de los clientes con el propósito de reutilizarlo, repararlo, refabricarlo, reciclarlo o desecharlo (Agrawal, Singh, & Murtaza, 2015).

Se pueden considerar los conceptos de logística inversa y logística verde como sinónimos en algunos ámbitos, ya que ambos forman parte de la cadena de suministro y tratan de reducir el impacto medioambiental de la actividad de la empresa mediante actuaciones sostenibles, como puede ser el reciclado de residuos.

La “logística verde” es un elemento básico de la economía circular, que supone que exista un flujo de material dentro de un sistema económico, de manera que las materias primas vuelven al sistema y se reutilizan (Seroka-Stolka & Ociepa-Kubicka, 2019). Diferentes autores (Govindan & Soleimani, 2017) han discutido los conceptos de la cadena de suministro de circuito cerrado (CLSC) y la logística inversa (RL) como una posible integración en el proceso de toma de decisiones para problemas de objetivos múltiples con respecto a enfoques ambientales.

La gestión sostenible de residuos implica un enfoque de criterios múltiples en el que las organizaciones públicas y privadas y la comunidad toman decisiones, enmarcadas por el tiempo y el espacio, de acuerdo con sus propias dinámicas y condiciones (Banguera, Sepúlveda, Fuertes, Carrasco, & Vargas, 2017).

Así pues, el objeto de este trabajo va a ser realizar un análisis de la gestión de pedidos dentro de las cadenas de suministro inversas, utilizando un sistema dinámico para tratar de sortear la incertidumbre existente sobre los retornos. Concretamente, se aplicarán los conocimientos adquiridos de la revisión de la literatura para el diseño de un modelo de simulación, que permita conocer en qué grado se pueden emplear los teléfonos móviles que actualmente están en uso en el mercado español para la fabricación de nuevas unidades, sustituyendo así a las actuales cuando sea necesario.

### 1.2. Objetivos del trabajo

El objetivo general de este trabajo es diseñar un modelo de simulación que permita conocer en qué grado se pueden emplear los teléfonos móviles que actualmente están en uso en el mercado español para la fabricación de nuevas unidades, sustituyendo así a las actuales cuando sea necesario, reduciendo los costes de adquisición de materias primas y minimizando al máximo el impacto medioambiental.

La cadena de suministro que se va a modelar es una cadena de suministro de circuito cerrado donde, una vez los usuarios desechan los móviles que ya no desean, los residuos son recuperados con el fin de reutilizarse, repararse, desmontarse para el uso de los componentes, desecharse correctamente o recuperar las materias primas para la fabricación de nuevos productos.



Para conseguir este objetivo, se va a buscar alcanzar diversos objetivos más específicos:

- Conocer la utilización actual de los modelos, tanto matemáticos como de simulación, para la gestión de cadenas de suministro inversas o de circuito cerrado cuando exista incertidumbre.
- Estudiar la evolución de la gestión de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) donde se encuentran los móviles, para conocer las tendencias, la normativa y los objetivos y métodos de reciclaje de éstos a nivel mundial.
- Analizar la situación actual de la gestión de RAEE en España, y concretamente la del mercado de telefonía móvil y sus características.
- Construir un conjunto de diagramas y modelos que permitan representar el sector de telefonía móvil en el mercado español, de manera que se puedan analizar las tendencias pese a la incertidumbre sobre algunas de las variables.
- Validar el modelo y evaluar los posibles escenarios.

### 1.3. Metodología y estructura del trabajo

Para desarrollar este trabajo se va a emplear una metodología de investigación compuesta de las siguientes fases:

1. Revisión del estado del arte: como bien se ha dicho, se va a realizar una revisión de diversos artículos científicos relacionados con la gestión de pedidos en cadenas de suministro inversas o de circuito cerrado cuando exista incertidumbre. Esta revisión estará presente en el Capítulo 2, donde se aplicará una metodología concreta para desarrollar un correcto estado del arte, y posteriormente se presentarán las conclusiones del análisis realizado.
2. Análisis del problema: se deberán de considerar todas las variables y restricciones del caso que se desea resolver, con el fin de identificar el comportamiento del sector y sus peculiaridades. Este análisis se encontrará en el Capítulo 3 y servirá de punto de partida para el desarrollo del modelo.
3. Construcción del modelo: en base a las características del problema analizado, se irán generando, primero, una serie de diagramas que representen el problema que se desea modelar, y posteriormente, se diseñará un modelo que cumpla con todas las restricciones y contenga las variables pertenecientes al sector de telefonía móvil en España, apreciable en el Capítulo 4.
4. Validación del modelo propuesto: posteriormente, se deberá de validar el modelo sometándolo a una serie de técnicas de validación, presentes en el Capítulo 4. También se analizarán una serie de escenarios propuestos, con el fin de estudiar las posibilidades del modelo y dar solución al caso planteado en el Capítulo 3.
5. Mejoras del modelo: El Capítulo 4 se concluirá con la descripción de posibles mejoras para el modelo, y este apartado se ligará con el Capítulo 5, donde estarán presentes las conclusiones y las líneas futuras de investigación.
6. Documentación de la solución hallada: a lo largo del trabajo se irá documentando debidamente el desarrollo del proyecto, aportando las debidas referencias a documentación externa que se haya utilizado como apoyo.



## 2. ESTADO DEL ARTE

En esta sección se va a realizar un estado del arte sobre la gestión de pedidos en cadenas de suministro inversas con incertidumbre. Para ello, se realizará una búsqueda exhaustiva de artículos relacionados con este tema, y se analizarán aquellos que aplican modelos matemáticos o de simulación para gestionar la incertidumbre.

Con este análisis se pretende estudiar cómo se utilizan los diversos modelos para optimizar cadenas de suministro inversas, de manera que se puedan conocer los posibles modelos para resolver el problema que se plantea en el presente trabajo, relacionado con la gestión de los residuos de teléfonos móviles que se generan anualmente en España. Bien es cierto que los modelos matemáticos no son los idóneos para tratar problemas con un factor de incertidumbre, pero puede existir la posibilidad de que se pueda aislar una parte de la cadena de suministro donde no exista incertidumbre, y optimizarla utilizando un modelo matemático. Este modelo matemático no optimizaría la cadena a nivel global, pero podría llegar a una solución acorde con un modelo de simulación que se encargara de analizar el conjunto de la cadena.

También puede resultar interesante analizar las funciones objetivo que se plantean en los modelos matemáticos a la hora de crear un modelo de simulación, ya que permite focalizar el problema a objetivos más concretos. Es por ello por lo que se van a considerar estos modelos y no únicamente los modelos de simulación, que sí están diseñados para tratar la incertidumbre.

El factor de incertidumbre estará presente en el problema real que se desea resolver en este trabajo, dado que en las cadenas de suministro inversas existe un factor de incertidumbre tanto sobre la cantidad de residuos que se van a recolectar y los que se van a perder, como sobre la calidad de los materiales recolectados. También puede existir incertidumbre en cuanto al ciclo de vida del producto o sobre la capacidad de recolección, reparación o reciclaje de las infraestructuras de la cadena. Por esto, se va a centrar el estado del arte el estudio de los modelos matemáticos y modelos de simulación en cadenas de suministro inversas con incertidumbre.

### 2.1. Gestión de pedidos

El proceso de gestión de pedidos se compone del conjunto de subprocesos o actividades necesarios para completar un pedido de un cliente. Se inicia cuando llega el pedido del cliente y éste se evalúa, y finaliza cuando el pedido se suministra correctamente a ese cliente. Entre estas dos acciones, se deben realizar tareas de planificación y control de la producción, planificación de las necesidades de materiales (MRP), planificación de la distribución, etc.

Desde este punto de vista, se puede considerar el proceso de gestión de pedidos como vital para la supervivencia de la empresa, dado que una buena gestión de los pedidos de manera que se satisfagan las necesidades de los clientes garantiza que se mantenga una cartera de clientes a largo plazo que sostenga a la empresa.

Por tanto, el proceso de gestión de pedidos se compone de diferentes fases que deben de cumplirse para su correcta gestión. Un listado de fases aproximado (Sanchis Gisbert & Poler Escoto, 2018), que debería de adaptarse según la empresa, podría ser:





- Gestión/previsión de la demanda.
- Recepción, validación y registro del pedido.
- Selección y priorización.
- Programación.
- Cumplimentación.
- Facturación.
- Devoluciones y reclamaciones.
- Servicio postventa.

El proceso de gestión de pedidos y todas sus fases deben de realizarse en cada uno de los eslabones de la cadena de suministro, es decir, entre los proveedores y los fabricantes existe una relación de vendedor/cliente. Por lo tanto, el proveedor deberá de asegurarse de cumplir correctamente con todos los pasos para satisfacer a su cliente (fabricante), quien a su vez deberá de gestionar sus pedidos para satisfacer a su cliente (minorista), y así hasta llegar al consumidor final.

Uno de los desafíos más importante en la gestión de pedidos de la cadena de suministro, es la coordinación de las políticas de pedidos adoptadas por cada nivel de la cadena, con el fin de minimizar los costes de inventario (Chaharsooghi, Heydari, & Zegordi, 2008).

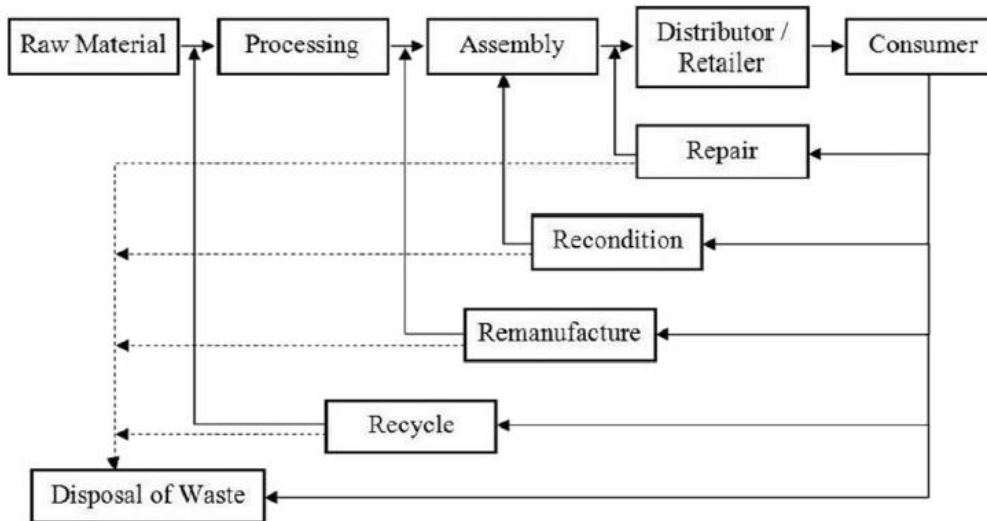
Según esta definición, la gestión de pedidos de la cadena de suministro se utiliza para determinar el tamaño del lote/pedido que debe de realizar cada actor de la cadena al miembro ascendente de esta, con la finalidad de minimizar los costes de inventario de toda la cadena, reduciendo las holguras, mejorando el servicio al cliente y aumentando los beneficios.

## 2.2. Gestión de pedidos en cadenas de suministro inversas

El enfoque clásico de la cadena de suministro, ahora llamado cadena de suministro directa, no siente ninguna responsabilidad por los productos al final de su vida útil (EOL en sus siglas en inglés). Luego, la cadena de suministro o la logística inversas intentan dar cuenta de los productos EOL de la manera más ecológica posible. La evolución de las cadenas de suministro lleva a un enfoque integrado de considerar tanto las cadenas de suministro hacia adelante como hacia atrás, creando la cadena de suministro de circuito cerrado (Govindan & Soleimani, 2017).

La gestión de residuos en una cadena de suministro inversa se compone de: reciclaje, reprocesado, reutilización, reparación, incineración y vertido. En los últimos años, el objetivo de la gestión de residuos es pasar de la eliminación segura a opciones atractivas medioambientales y económicas como reutilización de materiales o energía (Van Engeland, Beliën, De Boeck, & De Jaeger, 2020). Otra forma de nombrar esta clasificación, citada en (Kim, Chung, Kang, & Jeong, 2018), es “repair”, “refurbishing”, “remanufacturing”, “cannibalization” y “recycling”.

En la siguiente figura, se puede ver el flujo básico y general de un proceso productivo que incluye logística inversa.



**Ilustración 1:** Flujo básico de los procesos tradicionales y los relacionados por la logística inversa. Fuente: (Govindan & Soleimani, 2017)

Cabe destacar que las cadenas de suministro inversas a menudo se tratan de cadenas híbridas donde se realizan las funciones en ambos sentidos, de manera que los residuos que se generan de las ventas se recogen y reutilizan para generar nuevos productos.

Así pues, todas las operaciones y flujos en una cadena de suministro de circuito cerrado son una combinación de la cadena de suministro convencional y la inversa. La recolección, inspección, separación, reprocesamiento (reutilización directa, reciclaje, reparación, remanufactura), eliminación y redistribución de productos usados serían las operaciones principales del canal inverso.

Como se ha comentado con anterioridad, estas cadenas de suministro, tanto las inversas como las de bucle cerrado, suelen componerse de un factor de incertidumbre, al igual que las cadenas de suministro directas. La incertidumbre es un factor que se encuentra presente en la inmensa mayoría de las cadenas de suministro, variables como puedan ser la demanda o el tiempo de realizar un proceso son algunas de las que suelen estar presentes en las cadenas directas. En el caso de las cadenas inversas, la incertidumbre se centra en la calidad y cantidad de los materiales recogidos, los costes de su tratamiento en relación con los beneficios que se obtendrán posteriormente, el ciclo de vida del producto o la cantidad de residuos que se vierten sin control.

En este trabajo se pretende modelar una cadena de suministro que incluya el sentido directo e inverso (de bucle cerrado), de manera que esta cadena será susceptible de estar afectada por todas las variables de incertidumbre antes comentadas. Por ello, se va a realizar una revisión de la literatura que tenga en consideración este factor.



### 2.3. Gestión de pedidos en cadenas de suministro inversas con incertidumbre

Se va a realizar una revisión sistemática de la literatura mediante una metodología de análisis de contenido de acuerdo con el enfoque de investigación abductiva. Esta metodología se compone de 6 pasos, y está basada en la utilizada por (Prajapati, Kant, & Shankar, 2019a). Los pasos que sigue son:

1. Recolección de material: selección de las bases de datos y selección de palabras clave para encontrar los artículos adecuados.
2. Refinamiento de materiales: se filtra aún más la búsqueda de artículos para obtener una lista más reducida que se analiza para realizar la selección final de artículos.
3. Estudio descriptivo: se realiza un análisis estadístico de las publicaciones seleccionadas según autor, fecha de publicación, geografía, ...
4. Selección de categorías: localización de temas sobre los que se diversifican los artículos.
5. Análisis categórico: codificación y disposición de los artículos según la composición de la literatura.
6. Resultados y conclusión.

#### 2.3.1. Recolección de materiales

El primer paso es recolectar el material a analizar. Para ello, se ha llevado a cabo una búsqueda estructurada en diversas bases de datos partiendo de una serie de palabras clave.

Tras la identificación de las palabras clave que mejor se ajustaban al tema que se desea analizar, las que se han utilizado para la elaboración de esta búsqueda han sido: “Waste management”, “Reverse logistics”, “Closed-loop supply chain”, “End-of-life”, “Supply chain management”, “Orders management” y “System Dynamics”.

Las bases de datos utilizadas han sido “ScienceDirect” y “Scopus” como buscadores de material bibliográfico. Se realizó una búsqueda de artículos publicados en inglés en estas bases de datos en abril del 2020 con las palabras clave antes mencionadas. Otros criterios de búsqueda que se han tenido en cuenta han sido:

- Que los artículos se hayan publicado desde 2000 hasta 2020.
- Que los artículos contengan alguna de las palabras clave en el título.
- Se ha limitado la búsqueda a “review articles” y “research articles”.

Tras realizar esta búsqueda, se obtuvieron los siguientes resultados:



<b>Keywords / Bases de datos</b>	<b>ScienceDirect</b>	<b>Scopus</b>
<b>Waste management</b>	6.944	5.029
<b>Waste management + System dynamics</b>	41	24
<b>Reverse logistics</b>	681	907
<b>Reverse logistics + System dynamics</b>	14	7
<b>Closed-loop supply chain</b>	510	908
<b>Closed-loop supply chain + System dynamics</b>	19	15
<b>End-of-life</b>	7.720	10.148
<b>End-of-life + System dynamics</b>	15	2
<b>Supply chain management</b>	4.208	3.492
<b>Supply chain management + System dynamics</b>	54	8
<b>Order management</b>	81	102
<b>Order management + System dynamics</b>	1	9
<b>System dynamics</b>	4.304	3.051

**Tabla 1:** Resultados de la búsqueda bibliográfica en las bases de datos.

### 2.3.2. Refinamiento de los materiales

De los artículos obtenidos en el apartado anterior, se debe de realizar una búsqueda más exhaustiva con el fin de reducir el número de artículos a analizar, descartando los que no se centren en el tema que se desea desarrollar. Se han excluido también aquellos artículos de carácter generalista o que se desviaban del tema que se desea analizar.

Tras aplicar nuevos filtros, según el tipo de artículo y el ámbito de estudio, se obtuvieron 139 resultados en “ScienceDirect” y 64 resultados en “Scopus”. Estos resultados se deben a que primero se extrajeron artículos de ScienceDirect, de manera que no se consideraron los duplicados en Scopus.

Tras descartar los artículos cuyo título se alejaba del tema a tratar, se seleccionaron 40 de “ScienceDirect” y 17 de “Scopus”, un total 57 artículos que van a ser utilizados para desarrollar este estado del arte.

### 2.3.3. Estudio descriptivo

A continuación, se tabulan las estadísticas de los detalles bibliográficos de la literatura seleccionada, es decir, de los 57 artículos que se van a utilizar para desarrollar el estado del arte. De esta manera se analizarán los materiales obtenidos de manera descriptiva, sin entrar a estudiar el contenido.

Inicialmente, se ha observado el año de publicación de los artículos con el fin de obtener si existía algún patrón. En el Gráfico 1 se puede observar como la tendencia es creciente, dado que en los últimos años cada vez existe más concienciación sobre temas medioambientales y se realizan más estudios de como reciclar el máximo de materiales. Se ve como el pico de publicaciones se sitúa en 2019, y como la tendencia para el 2020 es similar, dado que debemos tener en cuenta que esta revisión se ha realizado tras el primer trimestre de 2020, en el mes de abril. Por ello, si se siguiera ese ritmo de publicación a lo largo de todo el año 2020, en enero de 2021 habría cerca de 24 nuevas publicaciones del año anterior, y se puede esperar un ritmo de crecimiento similar en las publicaciones para los años siguientes, debido a que la gestión de la cadena inversa es un tema cada vez más estudiado y presente en las empresas.



**Gráfico 1:** Número de publicaciones por año.

También se ha analizado el número de artículos según la revista. Como se puede observar en el Gráfico 2, hay un gran número de revistas que han publicado artículos sobre cadenas de suministro inversas, pero la mayor parte de ellas únicamente ha publicado 1 artículo en los 20 años analizados, por lo que no se considera que este tema haya tenido un gran interés en estas publicaciones. Podría llegar a pensarse, viendo los datos del gráfico anterior, que ha sido el creciente interés de los últimos años en la logística inversa lo que ha provocado que se realicen estas publicaciones. De ser así, el número de publicaciones en algunas de las revistas podría llegar a sufrir un gran aumento debido a la tendencia existente del aumento anual de publicaciones.

Por otro lado, existe una revista que posee el 30% de las publicaciones, el Journal of cleaner production, con 17 publicaciones en 20 años. Esto se debe a que la propia revista se centra en temas relacionados con la producción verde, por lo que no es de extrañar que también analice la gestión de todos los residuos que genera esa producción.

Como se puede observar, las revistas que cuentan con un mayor número de publicaciones son aquellas relacionadas con la investigación operativa, la gestión de los recursos, la conservación y el reciclaje, la gestión de residuos y la economía de la producción. Por tanto, la mayoría de los artículos habrían sido publicados en revistas relacionadas con la gestión de los recursos y la recuperación de los residuos fruto de la producción, la cual debe de ser lo más sostenible posible. También pueden encontrarse en revistas sobre investigar mejoras para la producción y las operaciones de la empresa.



**Gráfico 2:** Número de publicaciones por revista.

Este análisis descriptivo que se ha realizado proporciona una base para el análisis de contenido.

#### 2.3.4. Selección de categorías

Se van a definir una serie de categorías mediante las cuales se podrá analizar y clasificar el contenido de los diversos artículos seleccionados.

Así pues, se han podido diferenciar dos grandes grupos entre los artículos: los que plantean modelos cuantitativos para la planificación de la cadena de suministro inversa y los que hacen una valoración de carácter más cualitativo. Dentro de los modelos cuantitativos, encontramos modelos matemáticos y de simulación. De los 57 artículos seleccionados, tras realizar un análisis más exhaustivo de sus resúmenes y la estructura, se ha decidido utilizar únicamente 34 para desarrollar este trabajo.

Esto ha sido debido a que se ha preferido profundizar en los modelos matemáticos y de simulación aplicados a la gestión de pedidos de la cadena de suministro inversa, ya que se han considerado la base para desarrollar el trabajo, y se han dejado aparte los documentos que analizan otros temas relacionados con la logística inversa: aspectos tácticos/operativos (Bal & Satoglu, 2018; Ghiani, Laganà, Manni, Musmanno, & Vigo, 2014; Prajapati, Kant, & Shankar, 2019b), planificación (Dondo & Méndez, 2016), stakeholders (Chen et al., 2019; Govindan & Bouzon, 2018), economías de escala (García & Hora, 2017; Gu, Wei, Zhang, & Yan, 2019), economías circulares (de Oliveira, Mônica, & Campos, 2019), el internet de las cosas (Dev, Shankar, & Swami, 2019), transporte (Casper & Sundin, 2018), packaging (Casper & Sundin, 2018; Guarneri, Cerqueira-Streit, & Batista, 2020), gestión de residuos municipales (Bing et al., 2016; Mesjasz-Lech, 2019), etc., a pesar de ser varios de estos artículos muy interesantes.

Estos otros artículos han quedado fuera del análisis debido a la dificultad que suponía analizarlos conjuntamente con el resto de los artículos; al tratarse de artículos cualitativos, no se corresponden con las categorías ideadas para el análisis de los artículos que aplican un modelo matemático o de simulación, sino que se centran en otros aspectos que se salen del objeto de estudio del presente trabajo. Por tanto, para centrar el tema que se desea tratar (la gestión de pedidos en cadenas de suministro inversas o de circuito cerrado donde existe un factor de incertidumbre) se han suprimido estos artículos del análisis categórico.



Por tanto, para realizar el análisis de los artículos que plantean modelos cuantitativos, se han definido las siguientes categorías tanto para los modelos matemáticos como de simulación:

- **Método de modelado y de resolución.** Modelar consiste en emplear un modelo científico para transformar la realidad al lenguaje matemático, con la finalidad de obtener una representación simplificada de cualquier situación que se desee resolver. Al igual que existen un gran número de alternativas de modelado, existe un amplio abanico de posibilidades a la hora de resolver u optimizar los modelos que se plantean. Mediante esta categoría del estado del arte, se quiere conocer tanto el método que se ha seguido para el modelado como para la resolución de éste. En el caso de los modelos matemáticos, existen diversos métodos de modelado (programación lineal de enteros mixtos, programación estocástica en dos etapas, programación de objetivos múltiples, ponderados, etc.), mientras que en los modelos de simulación la mayor diferencia se encuentra en el programa donde se diseñan (VenSim, Anylogic, Powersim, Stella).
- **Número de productos.** A la hora de diseñar el modelo, el autor debe de decidir si va a considerar uno o más productos, dependiendo también de la problemática a resolver. Cuando se trate de la resolución de un problema real, con disponibilidad de datos, el modelo se adaptará al número de productos que se deban de considerar. En el caso de la creación de un modelo estándar, aplicable a un sector o circunstancia, se considerarán uno o más productos según la posibilidad de resolución del modelo y el sector donde se plantee aplicar. No hay que olvidar que un mayor número de productos supone un aumento de la complejidad del modelo, al mismo tiempo que dota al modelo de realismo si se desea aplicar a una empresa.
- **Existencia de incertidumbre.** Casi todos los artículos que se han analizado plantean un problema bajo incertidumbre. Esta incertidumbre puede proveer de varios factores: suministro, demanda, lead time, volumen de retornos, calidad de los retornos, capacidad de las infraestructuras, vida útil del producto y volumen de productos desechados y no recuperados; y se puede intentar sortear en los modelos matemáticos de diversas maneras, como pueden ser los métodos estocásticos, la programación difusa o la optimización robusta. En algunos modelos matemáticos se ha eliminado el factor de incertidumbre (aunque este siempre está presente en las cadenas de suministro) con el fin de simplificar el problema/modelo y poder llegar a una solución.
- **Sector de aplicación.** En esta categoría se pretende observar a qué clase de sectores se están aplicando los sistemas dinámicos para la gestión de pedidos/residuos. En algunas ocasiones, el modelo no se habrá ideado para ninguna situación concreta, por lo que podrá aplicarse en principio a cualquier sector, requiriendo como mucho de unas cuantas modificaciones. Los sectores que van a estar más presentes son aquellos relacionados con la gestión de residuos, ya sean urbanos, de la construcción, de vehículos, baterías, aparatos eléctricos o electrónicos (RAEE), etc.
- **Gestión de residuos.** Dentro de esta categoría, existe el reciclaje, reprocesado, la reutilización, reparación y el vertido o incineración. En este trabajo, se pretende analizar cuáles de estos subprocesos se tienen en mayor consideración, tanto por parte de las empresas como de los teóricos, a la hora de gestionar sus residuos. El subproceso de “verter” se considera que está presente en todos los casos, ya que lo que se desea es minimizar los vertidos y aumentar la tasa de gestión de estos en la mayoría de los casos





analizados. Con el subproceso de “incineración” lo que se consigue es obtener energía calórica que emplear en el funcionamiento de maquinaria, al mismo tiempo que se garantiza la destrucción de algunos residuos que resultan peligrosos si no desaparecen.

- **Dimensión sostenible considerada.** En esta categoría se va a analizar si el caso de estudio contempla únicamente el ámbito económico, o si añade a su modelo variables relacionadas con la mejora social y del medioambiente. De esta manera se podrá observar hasta qué punto se está introduciendo la sostenibilidad en la gestión de la cadena de suministro inversa.

Las categorías que únicamente se van a aplicar a los modelos matemáticos son:

- **Número de etapas.** Para este análisis se ha considerado como etapa a cada una de las fases de la estructura de la cadena de suministro que se incorpora en el modelo. De esta forma, los modelos de una única etapa serán aquellos que se centren únicamente en una parte de la cadena de suministro, como puede ser la distribución, el almacenamiento, aprovisionamiento, etc. En cambio, si el modelo contempla más de una fase de la cadena de suministro, se considerará que es multietapa.
- **Número de funciones objetivo.** Se van a considerar funciones objetivo a aquellas metas que se deseen optimizar, ya sean de carácter económico, social, etc. Estas funciones reflejan los objetivos reales del problema a resolver, y por ello pueden llegar a ser difíciles de representar. Las más habituales son la reducción de costes, de tiempos, el aumento de beneficios/ahorro, reducciones de inventario, aumento de residuos procesados, etc. En cada uno de los modelos planteados en este trabajo, se han determinado una o más funciones objetivo para resolver estas situaciones.

Y, por último, la categoría que sólo se aplica a los modelos de simulación es:

- **Número de escenarios.** Para este análisis se ha considerado como escenario a cada conjunto de variables que afectan al modelo y que difieren del resto de escenarios. De manera que, existirán casos donde solo exista un escenario (ideal o real) y otros donde se planteen una serie de escenarios para analizar la variación de los resultados si se dieran determinadas circunstancias.

Así pues, nos disponemos a clasificar los 34 artículos seleccionados dentro de estas 9 categorías (Tabla 2), según sus características en cada una de ellas, para su posterior comparación y análisis. Todos los artículos se clasificarán dentro de las categorías generales, y en las categorías que les correspondan según el tipo de modelo.





---

## Categorías

Generales:

1. Método de modelado y resolución.
2. Número de productos.
3. Existencia de incertidumbre.
4. Sector de aplicación.
5. Gestión de residuos.
6. Dimensión sostenible considerada.

---

Sólo modelos matemáticos:

7. Número de etapas.
8. Número de funciones objetivo.

---

Sólo modelos de simulación:

9. Número de escenarios
- 

**Tabla 2:** Clasificación de las categorías donde se van a analizar los diferentes artículos.

### 2.3.5. Análisis categórico

El quinto paso pertenece a la evaluación del material. Los artículos seleccionados para este estudio van a ser cuidadosamente inspeccionados, con el fin de realizar un análisis adecuado de los mismos. Así pues, se va a realizar un análisis de contenido y comparativo de los artículos según las categorías definidas en el apartado anterior.

Para este análisis, se van a diferenciar los artículos según desarrollen un modelo matemático o de simulación. Se ha considerado interesante analizar las ventajas de aplicar modelos matemáticos en CS inversas con incertidumbre, a pesar de que estos modelos no están diseñados para trabajar con incertidumbre y esta característica en sí ya resulta una desventaja.

#### 2.3.5.1. Análisis categórico de los modelos matemáticos

- **Método de modelado y de resolución.**

Se puede apreciar la utilización de diversos métodos de modelado según el problema planteado, dado que cada cadena de suministro funciona de manera única, atendiendo a una serie de variables como son la competencia, el sector, la demanda, el tipo de producto, etc.

A pesar de esto, se puede apreciar la repetida utilización de dos tipos de modelado en la mayor parte de los artículos, estos son: la programación lineal de enteros mixtos (PEM) y los métodos estocásticos de dos etapas.

En los artículos donde se ha planteado la utilización del PEM, los métodos resolutivos han sido de lo más diversos. En los casos en los cuales no existía incertidumbre, se han empleado como resolutivos el algoritmo genético (Roghianian & Pazhoheshfar, 2014) y el método de restricción epsilon (Zarbakshnia, Soleimani, Goh, & Razavi, 2019). En cambio, en situaciones de



incertidumbre, se ha recurrido a la optimización robusta (Kim et al., 2018) y a la resolución por números difusos (Lu, Zhu, Wang, Xie, & Su, 2020), donde se triangulaban las funciones difusas con el fin de obtener la solución óptima. También en casos de incertidumbre se recurrió a métodos estocásticos de dos etapas para resolver un modelo inicialmente PEM.

En el caso de los modelos estocásticos, son los que más se han utilizado en casos de incertidumbre en los artículos analizados. Estos modelos pueden resolverse mediante programas como CPLEX (Soleimani & Govindan, 2014) o métodos de aproximación promedio de muestra (Ayvaz, Bolat, & Aydin, 2015; Trochu, Chaabane, & Ouhimmou, 2019).

También se han utilizado métodos de programación de objetivos (GP) o de objetivos ponderados (WGP), estos modelos se han ideado para los casos de funciones objetivo-múltiples, donde se debían de optimizar diversas funciones. Para resolver estos modelos se han realizado simulaciones hasta hallar con el óptimo (Godichaud & Amodeo, 2015) y se han aplicado programas como el AUGMECON2 y CPLEX (Bal & Satoglu, 2018).

Existen otros métodos que se han utilizado en los casos donde no existía la incertidumbre, como es el cálculo del EOQ mediante algoritmos para determinar los niveles óptimos de inventario y el punto de corte donde se deben de realizar las recogidas de residuos (Sanni, Jovanoski, & Sidhu, 2020), el modelo de GAMS resuelto mediante CPLEX (Šomplák, Pavlas, Nevrlý, Touš, & Popela, 2019) y el modelo de ciclos sincronizados, donde se pretende sincronizar la empresa con los clientes para optimizar el flujo de productos y residuos, resuelto mediante un algoritmo genético (Chan, Man, Fang, & Campbell, 2019).

- **Número de productos.**

Como se ha dicho anteriormente, al añadir productos al modelo se aumenta su complejidad, y resulta más realista en el caso de querer aplicarlo a una situación real. También existen los casos donde la empresa considera un único tipo de producto, como es el caso de la gestión de desechos/residuos de demolición (Rahimi & Ghezavati, 2018; Trochu et al., 2019).

Si nos fijamos en el número de productos de los artículos considerados, podemos observar que no existe una gran diferencia entre la decisión de utilizar modelos aplicados a uno o más productos a la hora de resolver los problemas planteados.

Además, se puede apreciar una correlación entre la complejidad de los métodos utilizados y el número de productos. Los métodos de simple resolución suelen coincidir con modelos uni-producto, mientras que los métodos más complejos se emplean cuando aumentan el número de variables.

- **Número de etapas.**

Como ya se ha mencionado, se ha considerado como etapa a cada una de las fases de la estructura de la cadena de suministro que se incorpora en el modelo. De esta forma, los modelos de una única etapa serán aquellos que se centren únicamente en una parte de la cadena de suministro, como puede ser la distribución, el almacenamiento, aprovisionamiento, etc. En cambio, si el modelo contempla más de una fase de la cadena de suministro, se considerará que es multietapa.



Se observa como existe un predominio del uso de los modelos multietapa frente a los modelos que contemplan una única etapa. Esto se debe a que la mayoría de los artículos buscan una reducción de costes a lo largo de la cadena de suministro, por lo que tienen en cuenta diversas fases de ésta. En cambio, algunos artículos se centran en puntos concretos de la cadena de suministro, como puede ser la reducción de inventarios centrándose en el EOQ para conocer en qué momento resulta más económico recoger los residuos, considerando la perecibilidad de los productos (Sanni et al., 2020).

- **Número de funciones objetivo.**

Se han considerado funciones objetivo a aquellas metas que se deseaban optimizar, ya sean de carácter económico, social, etc. Estas funciones reflejan los objetivos reales del problema a resolver, y por ello pueden llegar a ser difíciles de representar. En este estudio, no se aprecia que exista un predominio de los modelos multifunción o de función única.

Si que se ha observado una correlación entre el grado de sostenibilidad considerada y el número de funciones objetivo. En los casos en los que se han considerado aspectos económicos, sociales y medioambientales hasta el punto de introducir estos parámetros en el modelo, se han generado modelos multifunción (Bal & Satoglu, 2018; Dutta, Mishra, Khandelwal, & Katthawala, 2020; Govindan, Paam, & Abtahi, 2016; Rahimi & Ghezavati, 2018). También se han generado en los casos en los cuales se han planteado diversas funciones económicas, como pueden ser reducir costes y tiempos de entrega, y en algún caso en el cual se ha considerado dos de los tres factores de sostenibilidad (Zarbakshnia et al., 2019).

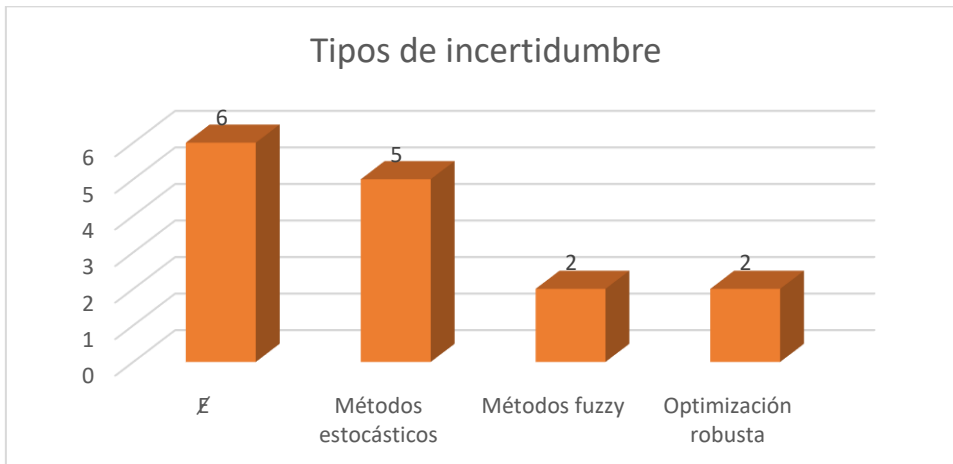
- **Existencia de incertidumbre.**

En una cadena de suministro hay muchos factores, relacionados con la demanda, los procesos y los suministros, que causan incertidumbre y afectan a la planificación, programación y el control de la cadena de suministro (Kim et al., 2018). Si añadimos a la cadena de suministro la logística inversa, este grado de incertidumbre aumenta, debido a que no es posible conocer la cantidad y el estado de los residuos retornados.

En el análisis realizado, se puede apreciar que en los casos donde se ha tenido en cuenta la existencia de incertidumbre, los factores que la han propiciado han sido la demanda en un 33% y el estado de retorno de los residuos en un 67%. En este caso, el 60% de los artículos analizados presentaban incertidumbre que, a pesar de no ser un porcentaje excesivamente alto, no es nada despreciable.

Para esta revisión literaria se ha decidido agrupar los artículos en cuatro grandes bloques según el modo de incorporar la incertidumbre al modelo: a través de técnicas estocásticas (o probabilísticas), de técnicas de lógica difusa (fuzzy), de métodos de optimización robusta y, por último, los que no consideran la incertidumbre.

Se observa que los métodos más utilizados son los estocásticos, concretamente los que dividen el problema en dos partes. Ya se ha comentado anteriormente que estos métodos pueden resolverse mediante programas como CPLEX (Soleimani & Govindan, 2014) o métodos de aproximación promedio de muestra (Ayvaz et al., 2015; Trochu et al., 2019).



**Gráfico 3:** *Tipos de incertidumbre presentes en los modelos matemáticos.*

- **Sector de aplicación.**

Se puede observar cómo no existe un sector predominante en esta materia, ya que la gestión de pedidos inversa puede aplicarse a cualquier actividad que genere algún tipo de residuo o desecho. Si que es cierto que se observa la repetición de sectores como la gestión de residuos, la industria de la demolición (que genera una gran cantidad de desperdicios) y los electrodomésticos o electrónica.

Esto último se debe a que este tipo de productos denominados oficialmente “Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos” (RAEE) o, en inglés, WEEE, generan una gran cantidad de desechos que resultan muy contaminantes para el medioambiente y que, por tanto, tienen asociadas un conjunto de normativas europeas que pretenden promover el reciclaje, la reutilización y la recuperación de todos estos residuos para reducir su contaminación. (Islam & Huda, 2018)

- **Gestión de residuos.**

La gestión de residuos en una cadena de suministro inversa se compone de: reciclaje, reprocesado, reutilización, reparación, incineración y vertido. En los últimos años, el objetivo de la gestión de residuos es pasar de la eliminación segura a opciones atractivas medioambientales y económicas como reutilización de materiales o energía (Van Engeland et al., 2020).

En cuanto a la manera en la que los artículos consideran la gestión de los residuos, se puede observar una clara predominación del reciclaje, ya que se considera en un 87% de los artículos. Esto se debe a que en los modelos se desea conseguir minimizar el número de residuos vertidos, el impacto social y medioambiental, y ahorrar costes reutilizando todas las materias posibles.

Le seguiría el reprocesado, utilizado en un 33% de los casos. La reutilización de elementos y la reparación se habrían tenido en cuenta en un 20% de las ocasiones, y corresponden sobre todo a casos de RAEE y ensamblajes, debido a que existen piezas aprovechables para otros productos y que resultarían contaminantes en caso de verse o incinerarse (Lu et al., 2020; Zorbakhshnia et al., 2019). La logística inversa es un proceso comercial importante en la industria del hierro y el acero para la recolección, reciclaje y reutilización de metales desechados (Gu, Wang, Dai, Wei, & Chiang, 2019).



Finalmente, se contempla la incineración de aquellos materiales que puedan resultar perjudiciales en caso de no reciclarse o destruirse, como es el caso de las agujas y las jeringas sanitarias, que son causa de numerosas enfermedades en países menos desarrollados debido a que se desechan sin ningún miramiento (Govindan et al., 2016).

- **Dimensión sostenible considerada.**

En este trabajo se ha tenido en consideración que se trataran temas de sostenibilidad y se añadieran a los modelos matemáticos a la hora de resolver los problemas planteados. Así pues, se han tenido en cuenta tres factores para medir la sostenibilidad:

- **Sostenibilidad social:** en algunos artículos se han incluido en los modelos conceptos como los salarios de los trabajadores, de manera que se pueda garantizar un sueldo mínimo al reducir los costes. Este factor ha sido el menos tenido en cuenta, ya que sólo en el 27% de los artículos analizados se ha incluido, a pesar de que la mayoría estaban a favor de que la cadena de suministro inversa y la gestión de residuos esté en equilibrio con la sociedad.
- **Sostenibilidad medioambiental:** en el 47% de los modelos se han introducido variables o funciones objetivo con la finalidad de reducir el impacto medioambiental. Este aspecto está muy unido a la logística inversa, ya que a ésta en ocasiones se le denomina “logística verde”, es pues esencial que exista una consideración de las variables ambientales en la creación de cadenas de suministro inversas.
- **Sostenibilidad económica:** se ha tenido en cuenta en el 100% de los modelos, ya que todos tienen como función objetivo reducir costes o aumentar beneficios.

Cabe destacar que existe una relación entre los factores, o al menos así se ha considerado, debido a que se puede apreciar un patrón en cuanto a la adaptación de éstos a los métodos. Esto se refiere a que en todos los casos en los que existe un factor social, existen los otros dos, no se considera el factor social sin haber considerado antes el económico y medioambiental.

Esto se interpreta como que el factor prioritario es el económico, seguido del ambiental y finalmente el social. No se están creando modelos que consideren el impacto social de la cadena de suministro sin tener controlados antes los otros dos factores.

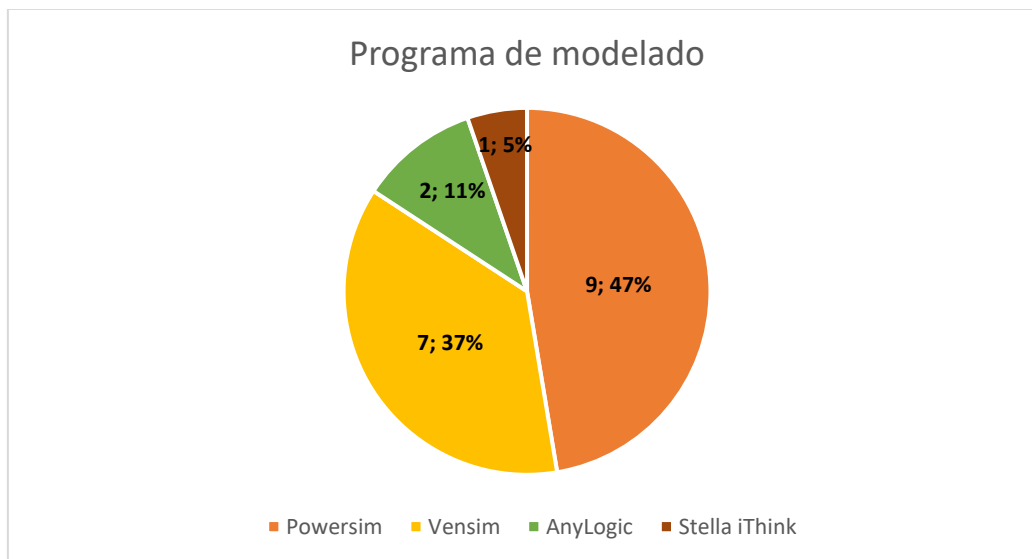
#### *2.3.5.2. Análisis categórico de los modelos de simulación*

- **Método de modelado y de resolución.**

Al contrario que en el caso de los modelos matemáticos, donde existía una gran variedad de modelos y resoluciones, para los modelos de simulación se ha aplicado en todos los casos analizados un sistema dinámico que permita resolver la incertidumbre del problema y dar rangos de valores a las variables.

Donde sí existe variación, es en el programa seleccionado para su resolución y en si se ha aplicado o no un análisis ANOVA. Así pues, se han utilizado 4 programas diferentes para realizar el diagrama de flujos del modelo: Stella iThink, AnyLogic, Powersim y VenSim. Como se puede observar en el Gráfico 4, los programas más utilizados son Powersim (47%) y VenSim (37%).

Por otra parte, Stella iThink únicamente fue utilizado por (Asif, Rashid, Bianchi, & Nicolescu, 2015) para ayudar a la toma de decisiones en productos con múltiples ciclos de vida, mientras AnyLogic lo utilizaron (Sinha, Laurenti, Singh, Malmström, & Frostell, 2016) para crear un circuito cerrado para los metales utilizados en la fabricación de teléfonos de manera que se pudieran recuperar las materias primas y reutilizarlas en nuevos modelos, y (Sudarto, Takahashi, & Morikawa, 2017) se valieron de este programa para crear una cadena de suministro flexible a largo plazo que pudiera garantizar una sostenibilidad social independientemente del ciclo de vida del producto.



**Gráfico 4:** Programas utilizados para realizar el diagrama de flujos.

- **Número de productos.**

Al igual que en el caso de los modelos matemáticos, los modelos de simulación se han empleado tanto para resolver problemas con un único producto como con múltiples productos.

Dado que se ha comprobado que la utilización de uno o más productos para diseñar el modelo se aplica en un 50/50 y no se ha hallado ningún producto que destaque, no se considera necesario extenderse más en esta categoría.

- **Número de escenarios.**

En los modelos de simulación es habitual analizar diferentes escenarios de cómo podrían evolucionar determinadas variables, con el fin de estar preparados ante la escasez de recursos naturales, variaciones bruscas en la demanda, un cambio significativo en la legislación medioambiental, etc. Con estos escenarios se pretende obtener los valores extremos que se podrían dar en la cadena, así como los valores medios si se dan una serie de condiciones.

No sorprende por ello que el 74% de los artículos analizados estudie múltiples escenarios, habitualmente 3, como pueden ser el pesimista, el continuista y el positivista (Patroklos Georgiadis & Besiou, 2010); el real, ideal o una simbiosis entre ambos (Besiou, Georgiadis, & Van Wassenhove, 2012; Patroklos Georgiadis & Besiou, 2008); según las políticas que se apliquen (Di Nola, Escapa, & Ansah, 2018), etc.

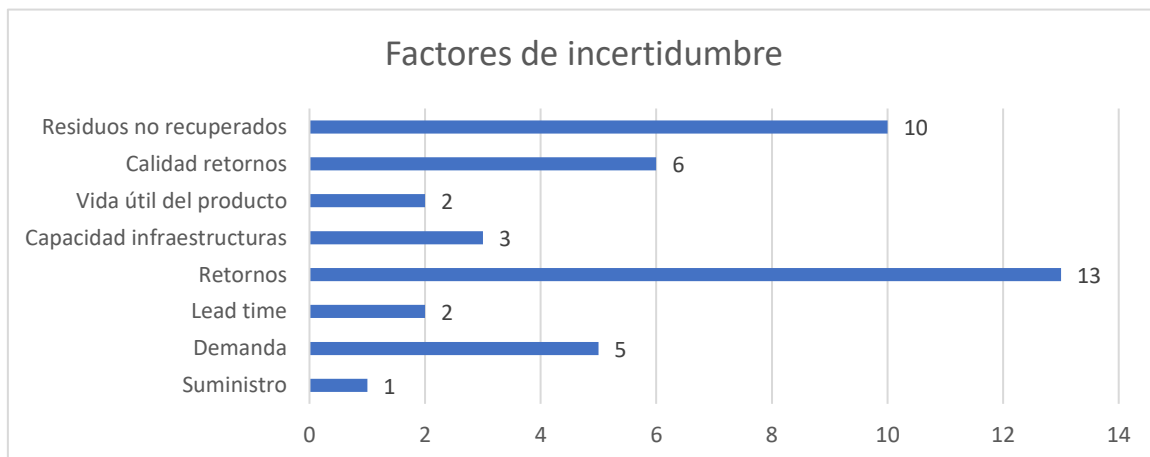
El 26% restante de los artículos presentan únicamente un escenario debido a que se centran sólo en optimizar una realidad (Golroudbary & Zahraee, 2015) o en crear una cadena de suministro inversa a partir de una cadena de suministro directa existente (Alamerew & Brissaud, 2020).

- **Factores de incertidumbre.**

Los modelos de simulación se diseñan para resolver problemas que presentan incertidumbre, ya que si se realizan correctamente proporcionan resultados más acertados que los modelos matemáticos. Por tanto, todos los artículos que se han analizado sobre dinámica de sistemas presentan al menos un factor de incertidumbre, como pueden ser el suministro, la demanda, el lead time, la cantidad de material recuperado, la calidad del material recuperado, la capacidad de las infraestructuras, la vida útil del producto y los residuos que no se recuperan.

Todos los factores mencionados pueden llegar a provocar incertidumbre en cualquier cadena de suministro inversa, dado que la mayoría son factores dinámicos que no se conocen con antelación y obligan a realizar previsiones y estimaciones futuras. Dicho esto, existen factores que en determinados sectores pueden tener una tendencia muy clara que elimine la incertidumbre, por lo que no todos ellos están presentes en todas las CS inversas.

En el Gráfico 5 se pueden observar los factores de incertidumbre hallados en los artículos estudiados y el número de artículos donde se considera cada factor, pudiendo tener un mismo artículo varios factores a considerar. Se ve de esta manera cómo la cantidad de los retornos y los materiales no recuperados que se pierden fuera de la cadena, son los dos factores más recurrentes, seguidos de la calidad de estos retornos recuperados y de la demanda del producto final.



**Gráfico 5:** Factores de incertidumbre considerados en los modelos dinámicos.

Mientras, otros factores como el suministro a la producción (Asif et al., 2015), la vida útil del producto (Patroklos Georgiadis & Athanasiou, 2010; Sudarto et al., 2017), el lead time (Patroklos Georgiadis, 2013; Patroklos Georgiadis & Athanasiou, 2013) y la capacidad de las infraestructuras (Di Nola et al., 2018; Patroklos Georgiadis, 2013; Vlachos, Georgiadis, & Iakovou, 2007) se consideran en un menor número de artículos debido a que resulta menos complejo realizar estimaciones o conocer los valores de estos factores en determinados sectores.





- **Sector de aplicación.**

Al contrario que en el caso de los modelos matemáticos, donde no existía un patrón en cuanto al sector, se considera que éste sí que existe en el caso de los modelos dinámicos.

Existen tres grupos:

- Artículos que realizan modelos aplicables a cualquier sector aplicando pequeñas modificaciones.
- Artículos que tratan la gestión de los RAEE antes mencionados, ya sea de manera general o centrándose en un sector dentro del RAEE concreto, como pueden ser los ordenadores (Blumberga, Timma, Romagnoli, & Blumberga, 2015; Ghisolfi, Diniz Chaves, Ribeiro Siman, & Xavier, 2017), los teléfonos móviles (Sinha et al., 2016) o las baterías de coche (Alamerew & Brissaud, 2020; Rosa & Terzi, 2018).
- Artículos que tratan sobre recogida de materiales independientemente del sector (hierro y acero (Asif et al., 2015), cartón (Patroklos Georgiadis, 2013), semiconductores (Golroudbary & Zahraee, 2015) y residuos urbanos (Di Nola et al., 2018)), que es el grupo de artículos que analiza los factores de incertidumbre de capacidad, demanda, suministro y lead time.

- **Gestión de residuos.**

En cuanto a la gestión de los residuos, se han considerado los mismos procesos que en el apartado anterior y se han obtenido porcentajes muy similares para los procesos de reciclaje (89%), reprocesado (37%), reutilización (21%) y reparación (16%).

La diferencia más notable respecto a los modelos matemáticos es en lo referente a la eliminación (68%), ya que los modelos de simulación suelen considerar el porcentaje de retornos que no se llegan a recuperar, y los que se recuperan pero se deben de eliminar dado que no es posible devolverlos al proceso productivo. Esto se debe en parte a que existe un alto grado de incertidumbre en la cantidad de los productos desechados que se consigue recuperar y reinsertar en la cadena, y sobre la calidad de estos, y los modelos basados en dinámica de sistemas intentan simular estas circunstancias con el fin de determinar unos rangos de materiales recuperados y útiles.

- **Dimensión sostenible considerada.**

Mientras que en los modelos matemáticos se podía observar como la sostenibilidad económica primaba sobre las demás, en los modelos de simulación siempre se consideran la dimensión medioambiental y económica. Coinciden en el caso de la sostenibilidad social, ya que en este caso también es dejada más aparte, a pesar de que se tiene ligeramente más en cuenta (un 32% frente al 27%).

Esto puede deberse a que mientras en el caso de los modelos matemáticos las dimensiones consideradas se relacionaban con las funciones objetivo determinadas, en los modelos de simulación, al no servirse de funciones objetivo para llegar a la solución, pueden considerar más dimensiones sin aumentar casi la complejidad del problema.



### 2.3.6. Resultados

Como bien se comentó al inicio del subapartado anterior, los modelos matemáticos no están capacitados para solventar problemas con incertidumbre. A pesar de conocer esto, se han analizado diversos artículos con el fin de conocer las ventajas e inconvenientes que presenta un modelo matemático en estos casos, como bien se pueden ver en la Tabla 3.

	Ventajas	Inconvenientes
Modelos matemáticos	<p>Permiten centrarse en los objetivos que se desean resolver</p> <p>Menor complejidad de diseño</p>	<p>En escenarios con incertidumbre, puede que la solución sea errónea</p> <p>La recogida de datos puede ser muy compleja</p>
Modelos de simulación	<p>Permiten obtener las tendencias de las variables en escenarios con incertidumbre</p> <p>Permite crear modelos de mayor complejidad y ver cómo reaccionan a diferentes escenarios</p>	<p>Mayor complejidad para diseñar el modelo, dado que no todas las variables serán estáticas</p>

**Tabla 3:** *Ventajas e inconvenientes de los modelos matemáticos y de simulación.*

Tras comprobar las ventajas e inconvenientes de cada tipo de modelo, se ha determinado que la mejor elección para solucionar el problema de este trabajo es un modelo de simulación, ya que solventa los posibles problemas en hallar datos muy concretos y los relacionados con la incertidumbre. Este tipo de modelo también facilitan la inclusión de la triple sostenibilidad en el modelo, elemento necesario, dado que el problema que se desea resolver se basa en la generación anual de una gran cantidad de residuos de teléfonos móviles en España. La gestión de estos residuos de manera correcta presenta las 3 dimensiones sostenibles: el ahorro económico de la extracción de materias primas de la naturaleza cuando resulta más sencillo recuperarlas de los aparatos usados, el beneficio medioambiental de no permitir montañas de productos con elementos tóxicos para el medio y los seres humanos, y el beneficio social debido a que la gestión de todos estos residuos supondría la creación de numerosos puestos de trabajo.

Con todo lo analizado a lo largo de este apartado, se han creado dos tablas resumen, una para cada tipo de modelos, que muestran las características de los artículos analizados, señalando en qué categorías se encuentran, que puede encontrarse en la Tabla 4 y Tabla 5.



Artículo	Método		nº productos		nº etapas		nº funciones objetivo		Nivel de Incertidumbre					Sector	Gestión de residuos					Dimensión sostenible considerada		
	Modelado	Resolución	Único	Multi.	Único	Multi.	Único	Multi.	∅	Métodos estocásticos	Métodos fuzzy	Optimización robusta	Factores		Reciclaje	Reprocesado	Reutilización	Reparación	Incineración	Social	Económica	Medio-ambiental
(Roghianian & Pazhoeshfar, 2014)	Programación lineal de enteros mixtos	Algoritmo genético		X		X	X		X					General	X						X	
(Soleimani & Govindan, 2014)	Programación estocástica de dos etapas con aversión al riesgo	CPLEX		X		X	X			X			Demanda y precios	General	X						X	
(Ayvaz et al. 2015)	Programación estocástica de dos etapas	Método de aproximación promedio de muestra		X		X	X			X			Retorno de productos y costes	Electrónica	X						X	
(Godichaud & Amodeo, 2015)	Programación de objetivos múltiples	Simulación y optimización	X			X		X				X	Retornos y plazos de entrega	General		X					X	
(Govindan et al. 2016)	Programación matemática difusa	Algoritmo metaheurístico de MOPSO y Método de restricción épsilon	X			X		X				X	Demanda, retornos, etc.	Sanitario	X			X	X	X	X	
(Rahimi and Ghezavati, 2017)	Programación lineal de enteros mixtos	Programación estocástica de dos etapas con aversión al riesgo	X		X			X		X			Demanda	Industria de demolición	X					X	X	X
(Bal et al. 2018)	Programación de objetivos	AUGMECON2 y CPLEX		X		X		X	X					Electrodomésticos	X					X	X	X
(Kim et al. 2018)	Programación lineal entera mixta	Optimización robusta	X			X	X					X	Retorno de productos	Moda	X	X				X		
(Zarbakshnia et al. 2018)	Programación lineal de enteros mixtos	Método de restricción épsilon		X		X		X	X					Electrodomésticos	X	X	X	X			X	X
(Chan et al. 2019)	Modelo de ciclos sincronizados	Algoritmo genético	X		X			X	X					General		X					X	
(Dutta et al. 2019)	Programación de objetivos ponderados (WGP)	Programación de objetivos (GP)		X		X		X		X			Retorno de productos	E-commerce	X				X	X	X	X
(Lu et al. 2019)	Programación lineal de enteros mixtos difusos	Resolución por números difusos triangulados		X		X		X				X	Retornos y residuos	Ensamblajes	X	X	X	X			X	
(Sanni et al. 2019)	EOQ	Algoritmos	X		X			X		X				General	X		X				X	
(Somplak et al. 2019)	GAMS	CPLEX		X	X			X		X				Gestión de residuos	X						X	X
(Trochu et al. 2019)	Programación estocástica de dos etapas	Aproximación promedio de muestra (SAA)	X			X	X			X			Materiales recolectados y tasas de reciclaje	Industria de demolición	X						X	X

Tabla 4: Tabla resumen del estado del arte modelos matemáticos.



Artículo	Año	Método		nº productos		nº escenarios		Nivel de Incertidumbre							Sector	Gestión de residuos					Dimensión sostenible considerada				
		Modelado	Resolucion	Único	Multi.	Único	Multi.	Suministro	Demanda	Lead time	Retornos	Capacidad infraestructuras	Vida útil del producto	Calidad retornos		Residuos no recuperados	Reciclaje	Reprocesado	Reutilización	Reparación	Eliminación/Incineración	Social	Económica	Medio-ambiental	
Alamerew, Yohannes A.; Brissaud, Daniel	2020	Sistema dinámico	Vensim	X		X			X								ELV	X	X	X	X		X	X	X
Asif, Farazee M. A.; Rashid, Amir; Bianchi, Carmine; Nicolescu, Cornel M.	2012	Sistema dinámico	Stella iThink		X		X	X									Hierro y acero	X						X	X
Besiou, Maria; Georgiadis, Patroklos; Van Wassenhove, Luk N.	2008	Sistema dinámico	Vensim y ANOVA		X		X								X		WEEE	X				X	X	X	X
Blumberga, Andra; Timma, Lelde; Romagnoli, Francesco; Blumberga, Dagnija	2015	Sistema dinámico	Powersim	X		X								X			Baterías de ordenadores	X					X	X	X
Das, Debabrata; Dutta, Pankaj	2013	Sistema dinámico	Vensim y ANOVA	X			X							X	X		Automóvil y electrónica	X	X	X		X		X	X
Di Nola, Maria Federica; Escapa, Marta; Ansah, John P.	2018	Sistema dinámico	Vensim		X		X							X	X		Residuos urbanos	X				X	X	X	X
Georgiadis, Patroklos; Vlachos, Dimitrios	2004	Sistema dinámico	Powersim	X			X		X							X	General	X	X			X		X	X
Georgiadis, P.; Vlachos, D.	2004	Sistema dinámico	Powersim	X			X								X		General	X	X	X	X		X		X
Georgiadis, Patroklos; Besiou, Maria	2008	Sistema dinámico	Powersim y ANOVA	X			X								X		WEEE	X				X		X	X
Georgiadis, Patroklos; Athanasiou, Efstratios	2010	Sistema dinámico	Powersim y ANOVA		X		X							X	X	X	General	X				X		X	X

Tabla 5: Tabla resumen del estado del arte modelos de simulación.



Artículo	Año	Método		nº productos		nº escenarios		Nivel de Incertidumbre							Sector	Gestión de residuos					Dimensión sostenible considerada			
		Modelado	Resolución	Único	Multi.	Único	Multi.	Suministro	Demanda	Lead time	Retornos	Capacidad infraestructuras	Vida útil del producto	Calidad retornos		Residuos no recuperados	Reciclaje	Reprocesado	Reutilización	Reparación	Eliminación/Incineración	Social	Económica	Medio-ambiental
Georgiadis, Patroklos; Besiou, Maria	2010	Sistema dinámico	Powersim y ANOVA		X		X				X			X	X	WEEE	X				X		X	X
Georgiadis, Patroklos	2013	Sistema	Powersim	X			X		X	X	X			X		Cartón	X					X	X	
Georgiadis, Patroklos; Athanasiou, Efstratios	2013	Sistema dinámico	Powersim		X		X		X	X	X			X		General		X				X	X	
Ghisolfi, Verônica; Diniz Chaves, Gisele de Lorena; Ribeiro Siman, Renato; Xavier, Lúcia Helena	2017	Sistema dinámico	Vensim		X		X				X				X	Ordenadores	X				X		X	X
Golroudbary, Saeed Rahimpour; Zahraee, Seyed Mojb	2015	Sistema dinámico	Vensim		X	X					X			X	X	Semi-conductores	X				X	X	X	X
Rosa, Paolo; Terzi, Sergio	2018	Sistema dinámico	Vensim		X		X		X		X					ELV	X					X	X	
Sinha, Rajib; Laurenti, Rafael; Singh, Jagdeep; Malmström Maria E.; Frostell	2016	Sistema dinámico	AnyLogic	X		X					X				X	Móviles	X	X	X	X	X		X	X
Sudarto, Sumarsono; Takahashi, Katsuhiko; Morikawa, Katsumi	2017	Sistema dinámico	AnyLogic	X		X						X				General	X				X	X	X	X
Vlachos, Dimitrios; Georgiadis, Patroklos; Iakovou, Eleftherios	2007	Sistema dinámico	Powersim	X			X								X	General		X			X		X	X

Tabla 5: Tabla resumen del estado del arte modelos de simulación (continuación).



## 2.4. Conclusiones

Una vez finalizada la revisión de la literatura, a manera de conclusión, se van a resumir las características extraídas de los artículos que afectan al problema que se desea resolver con este trabajo y que se describirá y analizará de manera detenida en el Capítulo 3. Así pues, lo que se ha aprendido de la realización del estado del arte es lo siguiente:

- No existe un tipo de modelo que resulte relevante según el número de productos que se deseen considerar en el problema, todos son aplicables en casos de productos únicos o múltiples de igual manera, por lo que no se considera un factor determinante a la hora de seleccionar un tipo de modelo u otro.
- Mientras que en todos los modelos de simulación se ha incluido algún tipo de incertidumbre que posteriormente se ha estudiado mediante la aplicación de escenarios, algunos de los modelos matemáticos suprimen la incertidumbre debido a que no están diseñados para gestionarla.
- Los modelos matemáticos presentan diversos tipos de modelado y resolución, mientras que los modelos de simulación se diferencian principalmente en el software utilizado para su resolución, esto facilita el planteamiento inicial del modelo en los casos de simulación.
- Los modelos matemáticos utilizados para intentar tratar el factor de la incertidumbre han sido los métodos estocásticos, los difusos y los de optimización robusta.
- Ambos tipos de modelo pueden aplicarse a cualquier tipo de sector que genere algún tipo de residuo o un flujo de devoluciones de producto.
- El método de gestión de residuos más empleado en todos los modelos es el reciclaje, y en el caso de los modelos de simulación también se suele tener en consideración la eliminación de materiales que no pueden reutilizarse de ningún modo. Podría resultar interesante de cara al proyecto incluir el resto de los métodos de gestión de residuos.
- Se ha observado cómo en los modelos de simulación estaba más presente la triple sostenibilidad, dado que todos ellos consideraban la dimensión económica y medioambiental, y el 32% incluía la social. En los modelos matemáticos, la mitad de ellos únicamente consideraban la dimensión económica, pero el 27% tenía en cuenta las 3 dimensiones.
- Para los modelos matemáticos, el análisis del número de etapas y de funciones objetivo ha mostrado que los modelos suelen considerar diversos niveles de la cadena de suministro, pero sólo la mitad de ellos se sirve de más de una función objetivo. Esto último está estrechamente relacionado con la triple sostenibilidad, ya que la función objetivo predominante es la económica y sólo si se incluyen más funciones se suelen considerar el resto de las dimensiones.
- Para los modelos de simulación se han analizado el número de escenarios, obteniendo como resultado que la mayor parte de los modelos se sirven de la utilización de diversos escenarios para estudiar la evolución del modelo según los parámetros de las variables que presentan incertidumbre.



- Se ha considerado interesante el análisis de los modelos matemáticos debido a que presentan menor complejidad de diseño y permiten focalizarse mejor en los objetivos que se desean resolver, a pesar de que no son los más acertados para tratar la incertidumbre.

Finalmente, se ha seleccionado el modelo de simulación como el idóneo para resolver el problema, ya que éste posee variables donde existe incertidumbre sobre los valores que se van a dar en una situación real y además permite incorporar las 3 dimensiones de la sostenibilidad de manera más sencilla.

Así pues, en un inicio no se utilizarán modelos matemáticos para resolver este proyecto, aunque como bien se ha comentado podría resultar interesante intentar aislar parte de la cadena del problema para resolver bucles donde no influya la incertidumbre.



### 3. CASO DE ESTUDIO

En este trabajo se pretende estudiar en qué grado se podría cubrir la producción de teléfonos móviles si se recuperasen los productos desechados y se aprovecharan sus componentes y materias primas. Para ello, en este apartado se va a explicar los posibles tratamientos a los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) desechados con el fin de recuperar el máximo posible para aprovisionar la cadena de suministro directa. Se van a definir las variables necesarias para obtener los resultados deseados y a darles valores acordes al problema, al igual que se van a describir las restricciones presentes en el modelo. Finalmente, se hará una estimación de cómo debería de funcionar un modelo que resuelva todo lo planteado y se realizará un resumen conclusivo del apartado.

#### 3.1. Gestión y normativa de los RAEE

Los RAEE se refieren a la mayor parte de los electrodomésticos del hogar y equipos de oficina que funcionen mediante electricidad. Estos residuos pueden clasificarse en siete categorías (MINISTERIO DE AGRICULTURA ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2015):

1. Aparatos de intercambio de temperatura (congeladores, calentadores).
2. Pantallas y monitores de más de 100 cm<sup>2</sup> (televisores, tablets).
3. Lámparas.
4. Aparatos grandes, exterior de más de 50cm (lavadora, lavavajillas, fotocopiadoras).
5. Aparatos pequeños, exterior de menos de 50cm (tostadora, microondas, juguetes, herramientas, calculadoras).
6. Aparatos de telecomunicaciones e informática pequeños (móviles, GPS, portátiles, impresoras).
7. Paneles fotovoltaicos.

Estas categorías se han elaborado en función de las características y de la vida útil de los productos, y cada una de ellas genera una cantidad de residuos y daña el medioambiente de una manera determinada.

El ciclo de vida de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) hasta convertirse en residuos (RAEE) que puede observarse en la



**Ilustración 2** se clasifica en 4 etapas (Baldé; C. P.; Forti; Gray; Kuehr; P.; R.; Stegmann; V., 2017):

1. Entrada al mercado: el AEE se vende a consumidores o empresas.
2. Almacenamiento: es la fase en la que el AEE permanece en los hogares y empresas
3. Generación de RAEE: el producto se estropea o queda obsoleto y se desecha, convirtiéndose en residuo eléctrico o electrónico.
4. Gestión de los RAEE: en esta etapa pueden darse diversos escenarios según su recogida.
  - a. Sistema oficial de retirada: se retiran los RAEE a través de los minoristas y los puntos y/o servicios de recogida. Estos RAEE se destinan a una instalación con tecnología avanzada donde de manera respetuosa con el medioambiente se recuperan el máximo de materiales reutilizables. Este escenario es el ideal.
  - b. Desechos residuales mixtos: los RAEE se desechan junto con el resto de los residuos de oficinas y el hogar, de manera que terminan en el vertedero o incinerándose. Estos tratamientos no son los deseables para los RAEE, ya que poseen elementos muy contaminantes que pueden filtrarse al suelo, al agua o a la atmósfera (Tabla 6).

<b>Materiales tóxicos de basura electrónica</b>	<b>Efectos para el ser humano y el medio ambiente</b>
<b>Cromo y óxido de Berilio</b>	Produce cáncer
<b>Plomo</b>	Déficit de atención, alteraciones de la conducta, hiperactividad, menor coeficiente intelectual.
<b>Mercurio</b>	Dermatitis, debilidad muscular, pérdida de memoria y deterioro sensorial.
<b>Cadmio</b>	Daño severo en los pulmones y fallos renales
<b>Azufre</b>	Daño hepático y renal, irritación de ojos y garganta, fallos en el corazón.
<b>PVC</b>	Libera cloro durante el deterioro que se vuelve tóxico
<b>Antimonio</b>	Es venenoso
<b>Ftalatos</b>	Producen impotencia

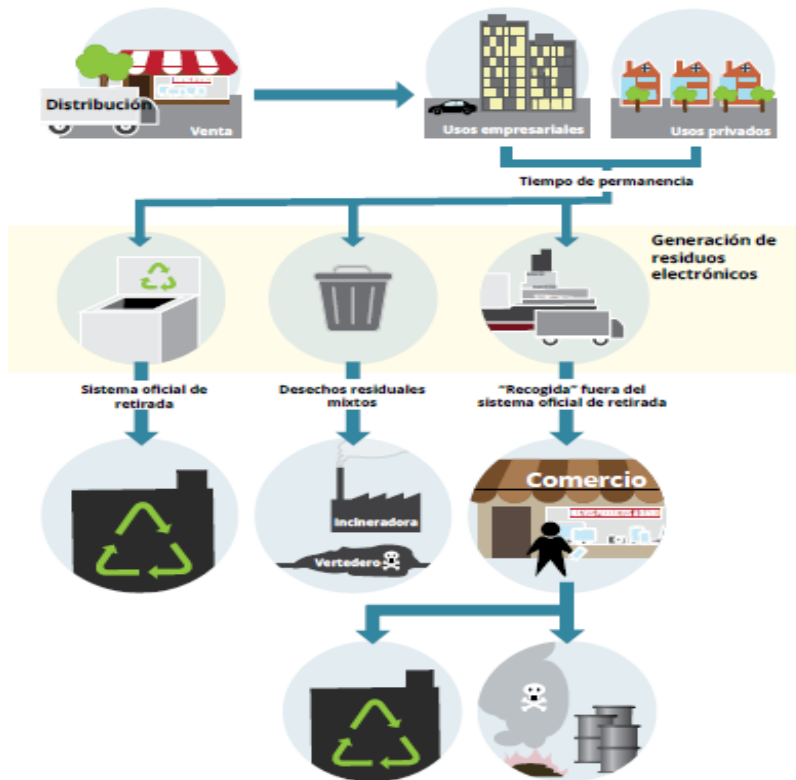
**Tabla 6:** *Materiales tóxicos de los RAEE. Fuente:*(Pascual, 2019)

- c. Recogida fuera del sistema de retirada oficial: en los países donde hay desarrollado un sistema oficial de retirada son las empresas las que recogen estos RAEE para su posterior comercialización de manera que se extraigan los materiales o se reparen y comercialicen los productos. En los países en desarrollo, trabajadores autónomos son los que se encargan de la retirada y reciclaje de los residuos, ya que su oficio se basa en comprar o recoger los RAEE de vertederos y venderlos en plantas de reciclaje o reacondicionamiento. Sobre estos modelos de recogida no oficiales se han diseñado modelos de simulación para prever el porcentaje de recogida (Besiou et al., 2012; Ghisolfi et al., 2017).

En España, el escenario que se aplica a los RAEE es una mezcla de los escenarios a) y b). Como se analizará en más profundidad en el siguiente subapartado, sólo cerca de un 35% de los



residuos siguen el sistema oficial de retirada (escenario a.), mientras que el resto se desechan junto con el resto de los residuos, de manera que acaban en un vertedero o se incineran (escenario b.). Esto supone que existe una notable cantidad de RAEE que no son ni recuperados ni eliminados como corresponde en España, de manera que el riesgo de que se viertan sustancias nocivas para la salud y el medioambiente es elevado.



**Ilustración 2:** Fases del ciclo de vida de los AEE y escenarios de la gestión de RAEE. Fuente: (Baldé; C. P.; Forti; Gray; Kuehr; P.; R.; Stegmann; V., 2017).

### 3.2. El sector móvil en España

Para centrarse en el problema a resolver, es importante determinar las variables que se consideren necesarias y conocer sus valores. Para poder estimar en que porcentaje se puede cubrir la demanda de fabricación con productos reutilizados, se debe de conocer: la cantidad de componentes y materiales que se puede recuperar de un teléfono móvil, la demanda futura de nuevos modelos, el ciclo de vida del producto, las políticas medioambientales que se aplican, etc. Existen variables para las cuales no se puede determinar un valor exacto, por lo que se deberán de aplicar valores aleatorios comprendidos en un rango. Para los valores que se desconozcan se deberán de determinar unos valores con el fin de analizar el comportamiento del modelo en los diversos escenarios.

- Productos en uso

Para estimar la cantidad de productos en uso, se ha considerado que la población en España en 2019 era de 46,94 millones de personas y el 80% de los españoles utilizan un teléfono móvil (Rivero, 2018), por tanto, habrían unos 37.552.000 móviles en uso en 2019 en España.



La cantidad de productos en uso se ha estimado también en base a un histórico de los datos de abonos a tarifas de teléfonos móviles en España desde 2002 hasta 2018. Hay que recalcar que el número de abonos no tiene por qué coincidir con el número de abonados, ya que una persona puede disponer de más de un abono o compartirse un abono entre varias personas, de la misma manera que una persona puede disponer de varios teléfonos móviles en el caso anterior.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Abonados reales	49.623.339	51.052.693	51.389.417	52.590.507	50.665.099	50.158.689	50.806.251	51.067.770	51.521.507	52.506.928	54.161.014	
Estimación						51.413.019	51.649.358	51.885.697	52.122.036	52.358.374	52.594.713	52.831.052

2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
53.067.391	53.303.729	53.540.068	53.776.407	54.012.746	54.249.085	54.485.423	54.721.762	54.958.101	55.194.440

2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
55.430.778	55.667.117	55.903.456	56.139.795	56.376.133	56.612.472	56.848.811	57.085.150	57.321.488	57.557.827	57.794.166

**Tabla 7:** Número de abono de teléfonos móviles y estimación de los abonos futuros. Fuente: (ITU, 2020)

Por tanto, se estima que en España hay actualmente entre 37.552.000 y 53.067.391 móviles en uso, lo cual supone un rango demasiado amplio.

- Ciclo de vida del producto

Los teléfonos móviles tienen una vida media de entre 18 y 24 meses. Esto se debe en parte a la obsolescencia programada, dado que según especialistas en la materia la parte mecánica y electrónica de un móvil debería durar entre 10 y 12 años, y el software entre 6 y 8 años.

La Tabla 8 muestra como en general el ciclo de vida de los móviles va en aumento, debido al aumento de la concienciación ecológica y a que renovar el actual móvil por el último modelo supone un gasto que cada vez menos gente está dispuesta a asumir. A pesar de esto, la vida media de un teléfono móvil en España sigue rondando los 20 meses, que es el valor que se va a asumir en el modelo.

	EE.UU.	China	EUS	Francia	Alemania	Gran Bretaña	Italia	España
2015	21,6	19,5	20,4	21,6	18,8	23,5	17,7	20,0
2014	20,9	21,8	19,5	19,4	18,2	22,0	18,7	18,2
2013	20,5	18,6	18,3	18,0	17,1	20,0	18,6	16,6

**Tabla 8:** Ciclo de vida medio en meses de los móviles según el país entre 2013 y 2015. Fuente: (Kantar Worldpanel & Guenveur, 2017)

- Demanda

Para estimar la demanda, se han considerado tanto los datos de población como de abonos, y se ha aplicado un ciclo de vida del producto de 20 meses y que la cifra de móviles en uso no espera sufrir grandes variaciones en los próximos años. Así pues, la demanda prevista oscilará entre las 433.292 y 609.589 unidades semanales. Esto supondría una demanda anual superior a los 20 millones de unidades.



- Componentes por producto

En función del número de componentes que se llegan a ofrecer por parte de empresas de repuestos o desde las propias marcas, se ha determinado que un teléfono móvil posee unos 20 componentes que se pueden reemplazar por un coste no muy elevado, de manera que no supere al valor actual del producto. Estos componentes serían: pantalla, batería, tapa trasera, cristal táctil, botón Home, flex conector de linterna/audio, bandeja de la tarjeta SIM, vibrador, antena GPS, cable de antena, lector tarjeta SIM, altavoz auricular, flex conexión del botón Home, antena WiFi, cámara trasera, altavoz inferior, cámara frontal, flex de carga, flex de volumen, flex de encendido.

- Materias primas por producto

Los móviles se fabrican a partir de materias primas muy escasas que resultan difíciles de hallar en el medioambiente, por lo que resulta más económico y es menos agresivo con el medioambiente reutilizar los materiales de los teléfonos que desecharlos. En la Tabla 9 se puede observar la concentración de materias primas por unidad de producto y el valor de estas en el mercado.

Elemento	Material reciclable (g/móvil)		Valor del metal 21/06/20 (€/g)		
	Bajo	Alto	€	Min (€)	Max (€)
Cobre	8,84	14,85	0,0052	0,045968	0,07722
Plata	0,30	0,31	0,503	0,1509	0,15593
Oro	0,028	0,037	49,69	1,39132	1,83853
Paladio	0,012	0,019	54,058	0,648696	1,027102
Total	9,2	15,2		2,236884	3,098782

**Tabla 9:** Cantidad de material y valor por móvil. Fuente: (Geyer & Blass, 2010).

- Políticas medioambientales

En España se aplica el Real Decreto 110/2015 (MINISTERIO DE AGRICULTURA ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2015) sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Los objetivos de esta normativa son:

1. Implantar un nuevo modelo de gestión de residuos con el fin de incrementar el control sobre la recogida y la cantidad de residuos para cumplir con los objetivos de la UE.
2. Establecer una regulación más clara para aumentar el nivel de seguridad jurídica y establecer una detallada descripción de cada una de las obligaciones de fabricantes, distribuidores, usuarios, importadores y gestores.
3. Fomentar el consumo sostenible mediante prevenir la generación de RAEE, la reutilización, el reciclado y otras formas de valorización, con el fin de reducir su eliminación y contribuir al uso eficaz de recursos y a la recuperación de las materias primas.



4. Evitar que se pierdan recursos valiosos por falta de reciclado, ya que los ciclos de innovación son cada vez más breves.

Para la consecución de estos objetivos, el Real Decreto (MINISTERIO DE AGRICULTURA ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2015) introduce los siguientes apartados:

- a) Los aparatos eléctricos y electrónicos deberán de financiar la gestión de sus residuos mediante campañas de información y concienciación sobre la correcta recogida, prevención y gestión de los residuos.
- b) Regulación del funcionamiento del Registro Integrado Industrial (RII): los fabricantes tendrán la responsabilidad de notificar la categoría y la cantidad de unidades que disponen en el mercado. Mediante esta medida, se determinará la cuota de responsabilidad del fabricante sobre la financiación anual de la gestión de residuos.
- c) Tanto las tiendas de venta de aparatos eléctricos y electrónicos, como las plataformas logísticas y los centros de distribución podrán constituirse como puntos de recogida de los RAEE. Aquellas tiendas de más de 400m<sup>2</sup> estarán obligadas a recoger dispositivos de menos de 25cm.
- d) Se homogeneizarán los requisitos técnicos para la concesión de autorizaciones a instalaciones de tratamiento de residuos para todo el país.
- e) Se pretende prevenir que se generen RAEE mediante la reutilización y reparación, y se regulan las categorías, plazos y porcentajes para llevarlas a cabo. Se pretende llegar a una tasa de recogida del 65% en 2019, partiendo del objetivo de una tasa del 45% en 2016.
- f) Se considera al producto como una unidad, sin considerar las legislaciones específicas de sus componentes.
- g) Se crea una correlación entre códigos LER (Lista Europea de Residuos) y las entradas y salidas de los procesos de tratamiento de los RAEE, de manera que se consiga una mejor trazabilidad del sistema.

En base a la normativa aplicable a los RAEE, se debería de emplear una tasa de reciclaje inicial del 65%, pero como se observa en la Tabla 10, el índice de recogida en Europa se encuentra en torno al 35%. Se podría fijar el 2030 como punto objetivo para alcanzar el 100% de tasa de recogida, en base a que es el año que plantean como objetivo los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas (Baldé; C. P.; Forti; Gray; Kuehr; P.; R.; Stegmann; V., 2017) para lograr la gestión de los RAEE para reutilización, reciclaje, remanufactura y recuperación de materiales, pero este informe también señala que desde 2009 la tasa de reciclaje en Europa ha sido de en torno al 37% y no se están consiguiendo los objetivos programados.

Por tanto, se analizarán 3 escenarios partiendo de un porcentaje de recogida del 35% en 2020: la consecución de los objetivos para 2030, para 2040 y para 2050, de manera que se analice un escenario positivista, realista y pesimista.



Indicador	África	Las Américas	Asia	Europa	Oceanía
Número de países de la región	53	35	49	40	13
Población de la región (millones de habitantes)	1,174	977	4,364	738	39
Residuos generados (kg/hab.)	1,9	11,6	4,2	16,6	17,3
Residuos generados totales (Mt)	2,2	11,3	18,2	12,3	0,7
Constan como recogidos y reciclados (Mt)	0,004	1,9	2,7	4,3	0,04
Índice de recogida (en la región)	0%	17%	15%	35%	6%

**Tabla 10:** Generación y recogida de RAEE según continente. Fuente: (Baldé; C. P.; Forti; Gray; Kuehr; P.; R.; Stegmann; V., 2017)

Así pues, el modelo que se debe de diseñar debe de considerar tanto las características descritas de los teléfonos móviles como de las políticas medioambientales que se les aplican. Deberá de contemplar los procesos de reparación, reacondicionamiento, remanufactura y reciclaje para los productos, con el fin de analizar hasta qué punto se pueden reducir los residuos y las ventajas que esto conlleva para la cadena.

### 3.3. Restricciones del problema

- Ninguna de las variables puede adoptar valores negativos, ya que no se contemplan ni costes negativos, ni unidades a deber, ni tiempos negativos.
- Existen variables que son continuas y otras que son enteras. Las variables enteras son aquellas que corresponden a las unidades de producto o componente, ya que no se consideran las fracciones de componentes o producto, sino que siempre son elementos enteros. Las variables relacionadas con gramos de materias primas, porcentajes o tiempos sí que pueden contener decimales.
- También hay diversas variables correspondientes a porcentajes que sólo pueden adoptar valores entre 0 y 1.
- Para subsanar la incertidumbre de algunas de las variables, será necesario determinar una serie de valores fijos que se apliquen según el escenario que se vaya a analizar, de manera que se convertirán en variables fijas algunas variables que en realidad utilicen valores englobados en un intervalo, el cual se desconoce.
- Se desconocen las restricciones relacionadas con la capacidad del problema. Bien es imposible que la cantidad de materiales que se puedan poseer para su tratamiento sea ilimitada, no se tienen datos sobre los límites de capacidad. También es cierto que esta restricción no se suele tener habitualmente en consideración en los modelos de simulación, debido a que se asume que en el caso de que se superara la capacidad actual, si la gestión de la cadena generara realmente algún beneficio, se realizaría una inversión para aumentar la capacidad tanto de almacenamiento como de producción y no sufrir pérdidas.



- Tampoco se conocen restricciones relacionadas con cuellos de botella o con disponibilidad de materias primas, a pesar de que se conocen las dificultades para conseguir recursos naturales, no se conocen datos aplicables a esta restricción ya que no se puede saber a ciencia cierta la cantidad de materiales que quedan disponibles en el planeta.

Todas estas restricciones forman parte de una idea de modelo inicial, por lo que podrán considerarse nuevas restricciones necesarias para la resolución del problema conforme se vaya diseñando el modelo y se analicen los resultados.

### 3.4. Funcionamiento esperado del modelo

Con todo lo descrito a lo largo de este apartado, se puede hacer un esquema inicial de cómo debe de funcionar el modelo.

Se sabe que deberá de contemplar la cadena de suministro directa y la inversa, y que deberá de componerse de variables de inventario, de variación de los inventarios, de porcentajes que se apliquen, de tiempos y probablemente de previsiones o ajustes para crear un modelo más realista.

El modelo deberá de poder reproducir diversos escenarios, ya que la existencia de incertidumbre en algunas variables dificulta analizar el modelo con un único escenario al deber de aplicarse diversos valores a esas variables y analizar su comportamiento y su efecto sobre el modelo.

Dado que el objetivo del modelo es utilizar los móviles desechados para llevar nuevos productos al mercado, se espera que en el largo plazo la adquisición de materias primas y componentes se vea notablemente reducida o tienda a 0, dado que el sistema de producción sea capaz de absorber la demanda de fabricación únicamente con los productos desechados.

También se espera que exista una estabilidad en la cantidad de productos en uso, a no ser que se produzca una variación significativa de la población o del modo de vida de los españoles que provoque una variación significativa en el uso de estos dispositivos.

Se espera que en el largo plazo la cantidad de residuos que se eliminan de manera incontrolada y no son recuperados disminuya, de manera que el nivel de RAEE no sufra un aumento exponencial, lo cual resultaría terriblemente perjudicial para el medioambiente.

Para todas las variables, se espera poder observar una tendencia a largo plazo, que indique que ninguna variable se ve afectada de manera exponencial, generando inestabilidad al modelo.

Finalmente, se prevé que la cantidad de móviles que ya no utilizamos, pero retenemos en nuestros hogares siga en aumento en el corto plazo, dado que aquellas personas que no desechan sus teléfonos habitualmente no lo harán hasta que se percaten de que poseen una cantidad absurda de teléfonos, sin ningún valor más allá del sentimental.



### 3.5. Conclusiones

En este apartado se ha realizado un análisis de los AEE en el mundo y del sector de teléfonos móviles en España, observando tanto los volúmenes de residuos que generan anualmente como las normativas que se les aplica. Tras estudiar estas cuestiones, se han extraído las siguientes conclusiones:

- En cuanto a los RAEE en general, se están produciendo una cantidad de residuos anuales exorbitada, para 2020 se prevé que se generen 50 millones de toneladas métricas en residuos eléctricos y electrónicos en el mundo, esto supone un gran impacto medioambiental debido a las bajas tasas de reciclaje.
- Se han llevado a cabo una serie de políticas medioambientales a nivel europeo que no se están cumpliendo en la actualidad, ya que lejos de mejorar la tasa de reciclaje, ésta se mantiene estable desde 2009 en Europa, situándose así lejos de los objetivos propuestos para el 2020.
- Respecto al sector del móvil en España, se ha observado cómo el nivel de productos en uso oscila entre valores que tienen como media aproximadamente la población actual. Esto junto con el hecho de que España presenta uno de los ciclos de vida más cortos para los móviles (20 meses), provoca que la demanda anual supere los 20 millones de unidades.
- También se ha determinado que el número de componentes reutilizables que se va a contemplar por unidad de producto es de 20 componentes.
- Se ha obtenido tanto la cantidad de metales valiosos que posee un móvil como su valor en el mercado como materia prima.
- Se han contemplado 3 escenarios para analizar cómo afecta el tiempo de consecución de las políticas medioambientales al modelo.
- Se han determinado una serie de restricciones conocidas, como que todos los valores deben de ser positivos, qué tipo de variables deben de ser de valores continuos o enteros, que los porcentajes se deben de expresar utilizando valores entre 0 y 1, y la necesidad de utilizar rangos/intervalos para aquellas variables que presenten incertidumbre.
- También se ha hecho una previsión inicial del funcionamiento del modelo partiendo de la base de los objetivos que se desean conseguir y del problema que se pretende representar. Las variables deberán de cumplir en todo momento con las restricciones del problema y se espera una estabilidad en las tendencias a largo plazo.

Tras haber definido estas variables y restricciones, y haber considerado el funcionamiento del modelo, se considera que ya se puede comenzar a diseñar el modelo inicial.



## 4. DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

En este apartado se pretende explicar el desarrollo del modelo de simulación a partir de una serie de pasos que permiten el análisis del problema a modelar, la determinación de objetivos, la creación del diagrama causal y del diagrama de flujos, la comparación de diversos escenarios y la validación del modelo. Para ello, inicialmente se ha diseñado un modelo capaz de simular una cadena de suministro inversa aplicada a cualquier tipo de RAEE, y posteriormente se han aplicado al modelo los valores relacionados con el problema expuesto.

Se ha tenido en cuenta en todo momento aquellas variables que se ven afectadas por un factor de incertidumbre, de manera que sea posible la generación de diversos escenarios con los que estudiar la tendencia del modelo según el valor que adopten estas variables. De esta manera, y como bien se ha comentado en el Capítulo 3, a las variables con un grado de incertidumbre que imposibilite estimar un intervalo de valores se les aplicará valores fijos según el escenario, y en aquellas para las que se pueda obtener un rango de valores se estudiará la tendencia que generan en el modelo.

### 4.1. Descripción de la cadena de suministro a simular

Como bien se ha explicado en el apartado anterior, este trabajo pretende simular el sector de la telefonía móvil. La cadena de suministro de los móviles es muy similar a la del resto de RAEE, como se puede observar en la Ilustración 3.



**Ilustración 3:**  
*Cadena de suministro de circuito cerrado.*  
Fuente: (Baldé; C. P.; Forti; Gray; Kuehr; P.; R.; Stegmann; V., 2017)





Se basa en la obtención de materias primas para proveer a la producción, para posteriormente aportar productos a los canales de distribución. Desde estos canales los productos llegan a los clientes, quienes después de un tiempo desechan los productos de manera que puedan reinsertarse en los canales de distribución o que deban de pasar por un proceso de reciclado para volver al nivel de la fabricación. Cuanto mayor es la tasa de reciclaje, menor es la cantidad de desechos que contaminan el medioambiente y menor la necesidad de extracción de materias primas.

Esta cadena de circuito cerrado es válida para todos los RAEE, por lo que es la que se va a modelar para los teléfonos móviles.

#### 4.2. Objetivos de la simulación

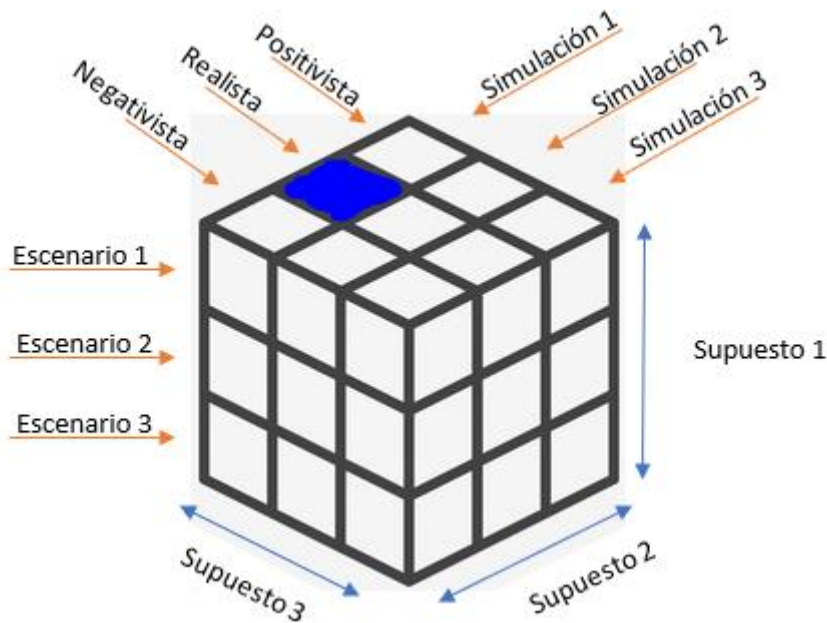
Para analizar el modelo propuesto, se van a diseñar 3 Supuestos, y para cada uno de estos, se va a estudiar como la variación de una de las variables incide sobre otra variable o sobre el modelo en general.

**Supuesto 1:** Se va a estudiar el comportamiento del modelo para cada tipo de metal recuperado y el valor tanto de los metales como de los componentes recuperados, de manera que se realizará una estimación económica de los beneficios del proceso de recuperación, remanufactura, reparación y reciclaje; utilizando 3 posibles conjuntos de costes e ingresos. El objetivo de este supuesto es conocer el beneficio máximo y mínimo obtenido por la cadena si se produjera una subida o bajada de los costes e ingresos.

**Supuesto 2:** Se han planteado tres posibles velocidades de aplicación de las políticas medioambientales en España, de manera que el porcentaje de recogida ronde el 100% para 2030 (1), 2040 (2) o 2050 (3). Se pretende analizar las consecuencias que tienen sobre el modelo estas variables, para conocer cómo afecta a los niveles de producción y a los inventarios que haya una mayor o menor recogida. También se observará la cantidad de móviles desechados sin control final, para conocer el impacto medioambiental de la aplicación de las políticas medioambientales.

**Supuesto 3:** Dado que no es posible estimar valores acordes con la realidad para todas las variables, se va a estudiar el modelo tras proveer de valores discretos a estas variables. Se va a estudiar el comportamiento del modelo al modificar la variable “porcentaje de remanufactura de componentes”, “porcentaje de producto remanufacturable” y “porcentaje de componentes para reutilización directa”, y van a aplicarse 3 valores discretos para cada una. Se pretende así observar qué procesos aportan más valor a la cadena, cómo se consigue una mejor gestión de los pedidos y los volúmenes de trabajo que se deberían de realizar, según se reutilicen un mayor porcentaje de productos (1), de componentes (2) o esté equilibrado (3).

Estos 3 Supuestos se encuentran interrelacionados entre ellos, de manera que existirán 27 combinaciones o escenarios diferentes según las combinaciones de las variables modificadas, y se denominan: Escenario nº Supuesto 1 + nº Supuesto 2 + nº Supuesto 3. El modelo base descrito será aquel que corresponda al escenario 1 realista con mayor tasa de remanufactura de productos (Simulación1) (Escenario 1,2,1; Ilustración 4).



**Ilustración 4:** Representación gráfica de los 27 escenarios finales posibles, mediante la combinación de los 3 supuestos, donde queda señalado en azul el escenario utilizado como base.

#### 4.3. Modelo de simulación

Para desarrollar el modelo de simulación, se ha seguido la metodología de Dinámica de Sistemas. Por ello, se ha desarrollado un diagrama causa-efecto o causal, que señala las relaciones existentes entre las variables del problema, y seguidamente se ha diseñado un diagrama de flujos que permita realizar la simulación.

Para realizar la simulación, ha sido necesario seleccionar uno de los softwares que se utilizan habitualmente para la resolución de este tipo de modelos. Existen múltiples softwares en el mercado, pero se ha decidido considerar únicamente los 4 que se han estudiado durante el estado del arte para acotar la selección.

Antes de seleccionar el software de simulación, es conveniente definir qué es un simulador. Es un objeto de aprendizaje que pretende modelar una réplica de un aspecto de la realidad a través de un software, con el fin de que la persona que crea el modelo conozca el funcionamiento de la realidad analizada y sea capaz de estudiar su comportamiento en diferentes situaciones. Por lo tanto, la simulación es un método de experimentación, ya que se estudia el comportamiento de unas variables tras modificar otras.

Tras haber observado los softwares Powersim, Vensim, Anylogic y Stella, se ha comprobado que su funcionamiento era bastante similar, de manera que se ha decidido realizar el modelo con el software VenSim, que es el que se ha utilizado durante el máster y, por tanto, el que mejor se conoce.



#### 4.3.1. Diagrama causal

Como bien se ha dicho, el diagrama causal representa las relaciones entre las diferentes variables del sistema, de manera que explica el comportamiento que generan unas sobre otras.

Para elaborar el diagrama causal, se han estudiado los diagramas causales presentes en los artículos analizados anteriormente, y se han utilizado como base. Se ha podido comprobar que la mayoría de los modelos se han construido aportando modificaciones a los modelos publicados anteriormente, de manera que en última instancia todos los modelos presentan variables comunes a los modelos que ya existían en 2004 de P. Georgiadis y D. Vlachos (P. Georgiadis & Vlachos, 2004; Patroklos Georgiadis & Vlachos, 2004).

Si se observa la Ilustración 5, se pueden apreciar una serie de variables que resultan comunes al resto de modelos de cadenas de suministro de bucle cerrado. Algunas de estas variables son:

- Variables relacionadas con la cadena directa: inventarios de materias primas (con su correspondiente tasa de adquisición), de producto y de distribución. Pedidos de producto, demanda y capacidad de producción.
- Variables relacionadas con productos usados: inventario de productos usados, ciclo de vida del producto, tasa de eliminación incontrolada y tasa de recolección.
- Variables de recuperación del producto usado: capacidad y ratio de recogida, productos recuperados e inspección de estos productos.
- Variables de reutilización o eliminación de los residuos recuperados: eliminación controlada, ratio de reutilización, inventario de productos reutilizables, ratio y capacidad de remanufactura.
- Otras variables: en este diagrama base también se tiene en cuenta la capacidad de expansión (de aumentar la capacidad de recogida, remanufactura o reutilización), la importancia de un factor de imagen verde/ecológica, y variables de ajuste que contemplan que no existe una comunicación perfecta entre los miembros de la cadena.

Si se analizaran el resto de los diagramas causales de los artículos analizados, se comprobaría cómo la mayor parte de estas variables están presentes, por lo que también deberán de estarlo en el diagrama causal que se realice para resolver el problema del proyecto.

El diagrama de la Ilustración 5 se compone de los bucles negativos de retroalimentación que dan estabilidad al modelo y de una serie de bucles positivos que muestran el itinerario que siguen los productos, de manera que a simple vista el diagrama parece estable y un modelo basado en él no debería porqué tener variables que tendieran a infinito.

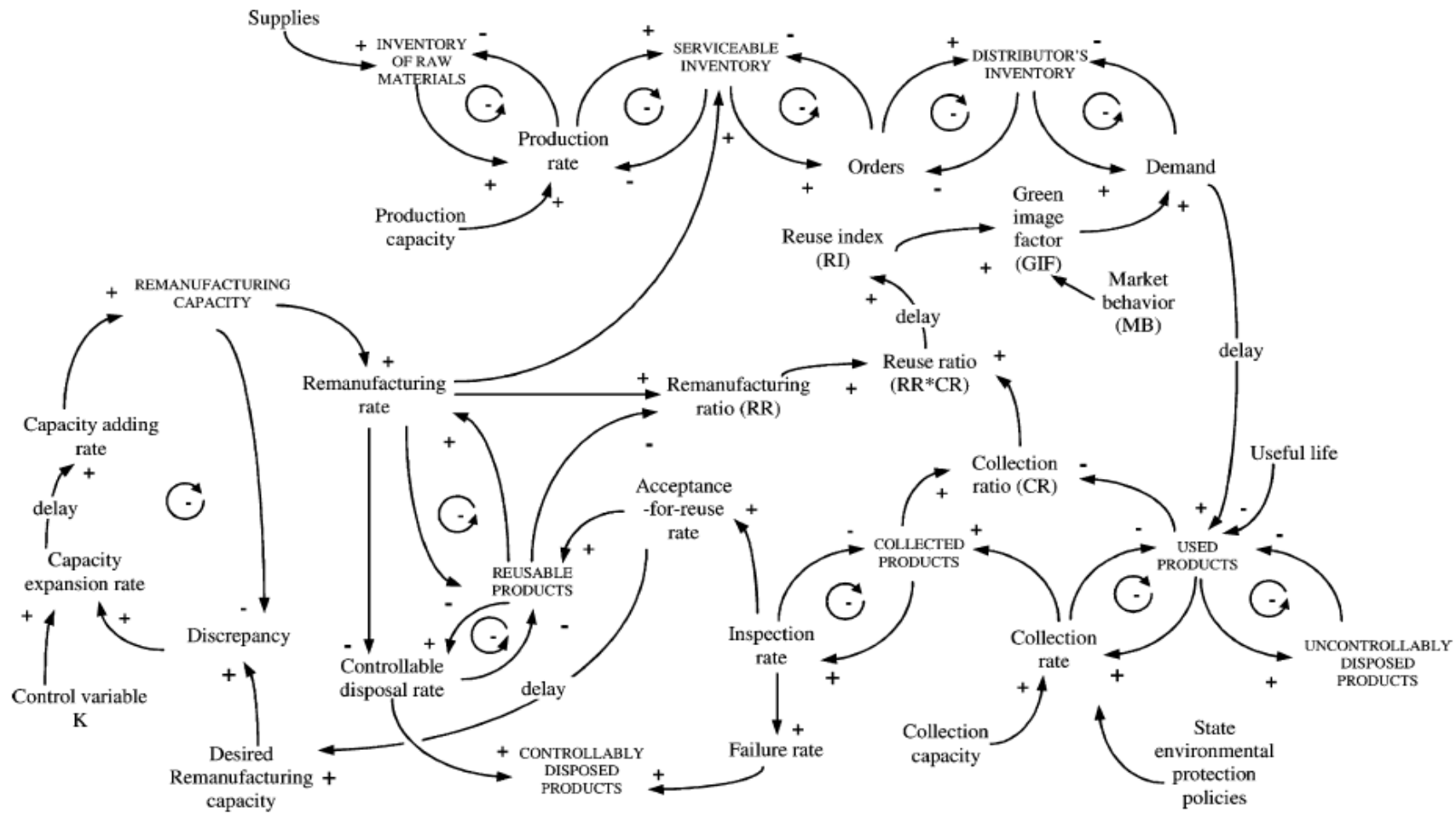


Ilustración 5: Diagrama causal tipo sobre una cadena de suministro directa e inversa. Fuente: (Patriklos Georgiadis & Vlachos, 2004).



El diagrama causal que se observa en la Ilustración 6 también posee algún elemento común con estos modelos originales, como son los elementos de la cadena de suministro directa y el contemplar la eliminación controlada y descontrolada, los productos usados, la recolección, la remanufactura y el reciclaje. También se han incorporado elementos de modelos creados para la gestión de RAEE, debido a que se asemejan al problema que se desea resolver (Das & Dutta, 2013), y se ha introducido el efecto de las políticas medioambientales, presentes en diversos artículos (Ghisolfi et al., 2017; Rosa & Terzi, 2018), y la hibernación del producto (Sinha et al., 2016).

No se han tenido en cuenta para este primer modelo las variables de capacidad, debido a que no se tienen datos ni sobre la capacidad de almacenamiento ni la de expansión, y no se desea añadir inicialmente más incertidumbre al modelo con el fin de simplificar un primer análisis. Esto será un punto a mejorar que se va a tener en cuenta durante el desarrollo del trabajo, y que se intentará solventar una vez se tenga un modelo inicial de simulación y se conozcan las tendencias de las variables sin restricciones de capacidad.

Por tanto, el diagrama causal (

Ilustración 6) muestra cómo en un sentido directo los recursos naturales pasan a ser materias primas, componentes, producto inventario en los puntos de venta y finalmente productos en uso. Estos productos en uso pueden seguir una serie de itinerarios que se explicarán a continuación y que corresponden a los bucles positivos del diagrama.

Así pues, el diagrama causal que se ha realizado posee 25 bucles negativos de retroalimentación para estabilizar el modelo, señalados en la

Ilustración 6, y 12 bucles positivos que representan los posibles recorridos de los materiales (Ilustración 7). Se puede observar cómo influye una variable sobre otra mediante el signo y el sentido de la flecha que las une, de manera que, si el signo es positivo, aumentar una variable aumenta la otra, y si es negativo, aumentar una variable disminuye la otra.

Los bucles negativos se corresponden a bucles de retroalimentación, donde un aumento de recursos naturales aumenta la tasa de adquisición, y un aumento de la tasa de adquisición disminuye el nivel de recursos naturales. Esto es así a lo largo de toda la cadena directa, de manera que se puede observar cómo las flechas que avanzan hacia la derecha presentan un signo positivo mientras que las que se dirigen hacia la izquierda tienen signo negativo. Una mayor tasa de adquisición de recursos naturales aumenta los niveles de stock de materias primas, una mayor tasa de producción de componentes aumenta el stock de componentes, quien a su vez abastece el stock de producto, que permite mayores pedidos y finalmente mayores ventas. En el sentido inverso, el abastecimiento del siguiente nivel provoca una disminución del anterior.

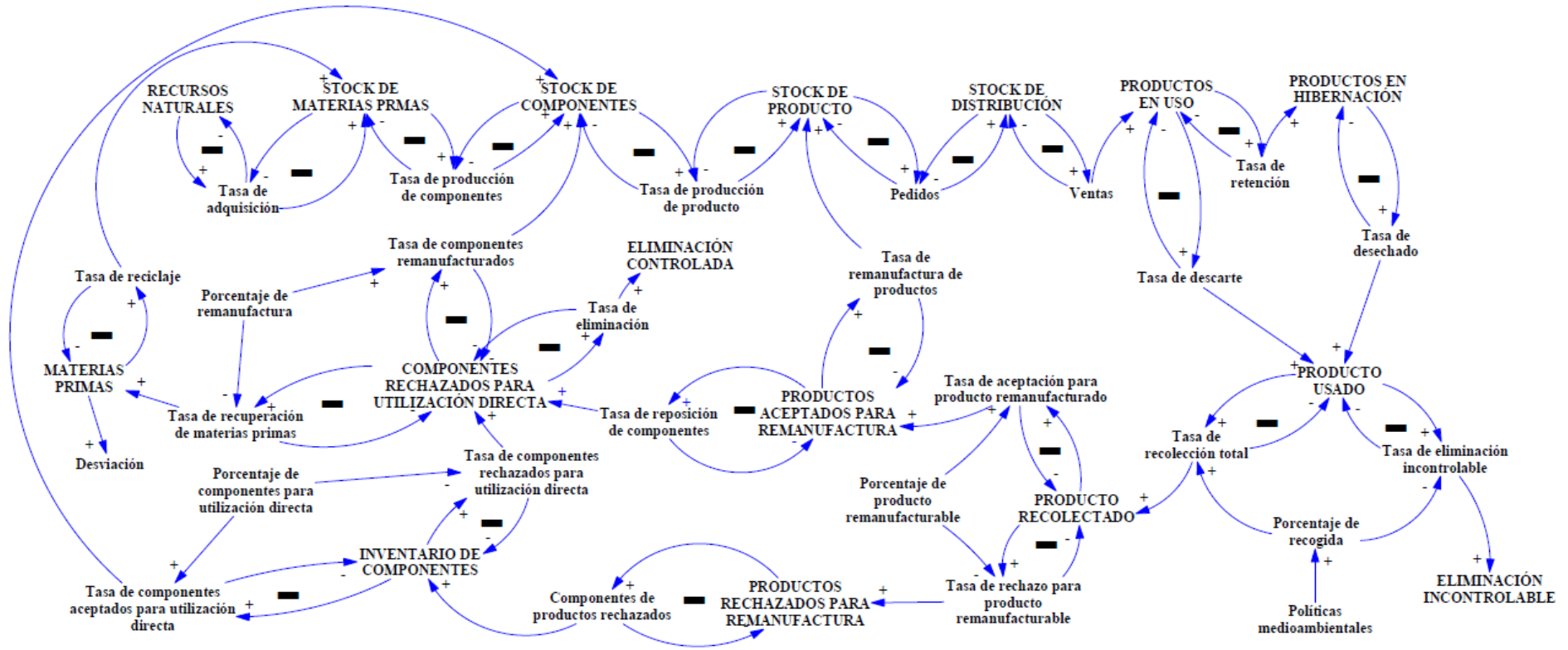


Ilustración 6: Diagrama causal de la cadena de suministro de bucle cerrado de los teléfonos móviles en España.





Como bien se ha dicho, esta dinámica de que cuando un inventario es mayor, mayor es la tasa que provee, y el aumento de esta tasa provoca una disminución del inventario, es la que explica los 25 bucles negativos presentes en el diagrama causal. Mientras que estos bucles negativos se consideran de retroalimentación, los 12 bucles positivos presentes en este modelo señalan el camino que recorren los materiales a lo largo de la cadena, señalando todos los recorridos posibles para convertirse nuevamente en productos en uso. Con el fin de facilitar la visualización de estos recorridos, se han señalado los bucles mediante códigos de colores, de manera que se pueda seguir el itinerario de los materiales fácilmente (Ilustración 7).

**Bucle 1 (naranja):** Una vez los productos dejan de estar en uso y pierden el valor para los usuarios, se descartan, aumentando el stock de productos utilizados. Si estos se aceptan para la remanufactura, aumentan el stock de productos aceptados para remanufactura, aumentando la tasa de remanufactura de productos y de esta manera el stock de producto, volviendo a incorporarse en la cadena directa. Una vez el producto vuelve a considerarse apto para la venta, aumenta la tasa de pedidos, que a su vez aumenta el stock de distribución, donde se originarán las ventas que volverán a convertir el producto en “producto en uso”.

**Bucle 2 (marrón + naranja):** Esta vez, los productos en uso son retenidos y pasan a ser productos en hibernación hasta que los usuarios se deciden a desecharlos, momento en el que pasan a considerarse productos utilizados. A partir de aquí se sigue el mismo recorrido que en el bucle 1.

**Bucle 3 (naranja + morado):** Los productos en uso siguen el mismo recorrido que en el bucle 1 hasta llegar a aumentar el stock de productos aceptados para remanufactura. Una vez llegan a este punto, los componentes dañados o defectuosos del producto se desmontan para determinar si se pueden reparar, si se eliminan o se recuperan las materias primas, de esta manera se aumenta el inventario de componentes rechazados para utilización directa. Posteriormente los componentes son reparados y se reincorporan al stock de componentes. A partir de este punto se vuelve a fabricar el producto, se distribuye y vuelve a convertirse en producto en uso.

**Bucle 4 (naranja + rosa + morado):** El camino que siguen los productos en uso es similar al anterior, únicamente varía debido a que el producto no se considera apto para la remanufactura en ningún momento, debido a los daños en el dispositivo. Pasa así a formar parte del inventario de productos rechazados para la remanufactura, donde se extraen sus componentes aumentando el inventario de componentes. En este caso, los componentes se consideran aptos para la reutilización directa al encontrarse en condiciones óptimas y pasan al stock de componentes, donde seguirán el transcurso de la cadena directa hasta volver a formar parte de productos en uso.

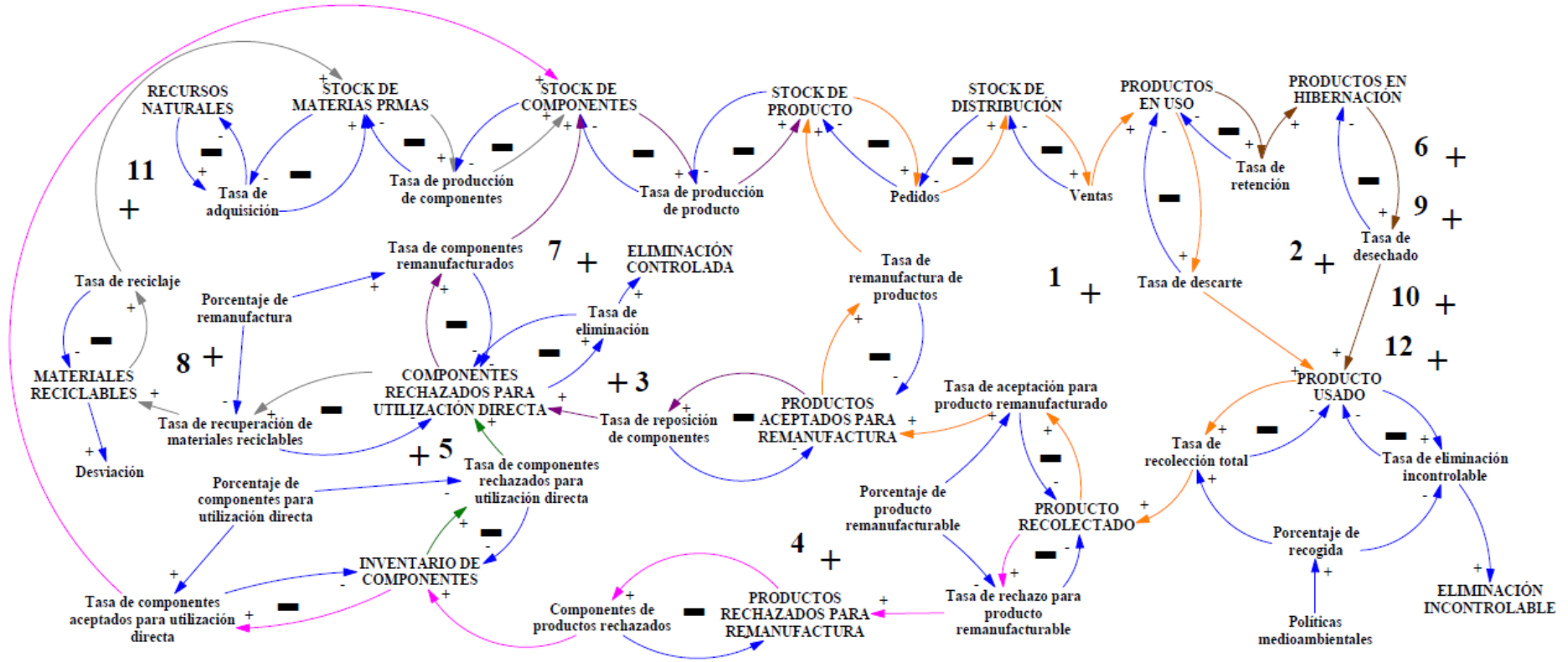


Ilustración 7: Diagrama causal de la cadena de suministro de bucle cerrado de los teléfonos móviles, señalización del itinerario de los materiales mediante un código de colores.





**Bucle 5 (naranja + rosa + verde + morado):** Al igual que en el bucle 4, los productos usados y posteriormente recolectados no se consideraron aptos para someterse a reparación, de manera que pasaron al inventario de productos rechazados para remanufactura y sus componentes se extrajeron para su inspección. En este caso, los componentes son rechazados para su utilización directa, por lo que se remanufacturan antes de llegar al stock de componentes, donde seguirán el transcurso de la cadena directa hasta volver a formar parte de productos en uso.

**Bucle 6 (marrón + naranja + rosa + morado):** Este bucle sigue el mismo camino que el bucle 4, sólo que el producto en uso pasa a un estado de hibernación antes de continuar su recorrido.

**Bucle 7 (marrón + naranja + morado):** Los productos en uso pasan al estado de hibernación antes de ser desechados. Una vez el producto usado es recolectado, se acepta para la remanufactura. Los componentes dañados del producto pasan al inventario de componentes rechazados para su utilización directa, donde se reparan y se vuelven a incorporar al stock de componentes. A partir de este punto los materiales siguen la cadena directa hasta volver a formar parte de producto en uso.

**Bucle 8 (naranja + morado + gris):** Los productos en uso pasan a ser producto usado, recolectado y aceptado para remanufactura. Los componentes dañados son extraídos de los dispositivos y rechazados tanto para la utilización directa como para su reparación o eliminación, por lo que pasan a considerarse materiales reciclables que una vez de reciclan se incorporan nuevamente en el stock de materias primas. A partir de este punto los materiales siguen la cadena directa hasta volver a formar parte de producto en uso.

**Bucle 9 (marrón + naranja + rosa + verde + morado):** Los productos en uso pasan al estado de hibernación antes de ser desechados. Una vez el producto usado es recolectado, se rechaza para la remanufactura, por lo que se extraen los componentes. Los componentes dañados pasan al inventario de componentes rechazados para su utilización directa, donde se reparan y se vuelven a incorporar al stock de componentes. A partir de este punto los materiales siguen la cadena directa hasta volver a formar parte de producto en uso.

**Bucle 10 (marrón + naranja + morado + gris):** Los productos usados sufren retención, por lo que hibernan antes de desecharse como producto usado y ser posteriormente recolectados. Son aceptados para remanufactura y se extraen los componentes dañados, que son rechazados para la utilización directa y se determina que pasen a considerarse materiales reciclables que una vez de reciclan se incorporan nuevamente en el stock de materias primas. A partir de este punto los materiales siguen la cadena directa hasta volver a formar parte de producto en uso.

**Bucle 11 (naranja + rosa + verde + gris + morado):** Los productos en uso pasan a ser producto usado, recolectado y rechazado para remanufactura, por lo que se extraen los componentes. Estos son rechazados para la utilización directa y para su reparación, por lo que pasan a considerarse materiales reciclables que una vez de reciclan se incorporan nuevamente en el stock de materias primas. A partir de este punto los materiales siguen la cadena directa hasta volver a formar parte de producto en uso.



**Bucle 12 (marrón + naranja + rosa + verde + gris + morado):** Los productos en uso pasan al estado de hibernación antes de ser desechados. A partir de aquí se recorre el mismo camino que en el bucle 11.

Con esto, se han determinado todas las relaciones entre las variables del modelo, por lo que se puede proceder al diseño del diagrama de flujos en VenSim. Es este modelo, se van a analizar concretamente los RAEE (residuos de aparatos eléctricos y electrónicos) relacionados con los residuos de teléfonos móviles, como ya se ha descrito en el problema.

#### 4.3.2. Diagrama de flujos obtenido a través de VenSim

El siguiente paso de la metodología de dinámica de sistemas consiste en transformar los datos iniciales con los que contamos y el diagrama de flujos (Ilustración 8) en ecuaciones que posteriormente se resolverán mediante simulación. Para ello, se han clasificado las variables según si eran de stock, de flujo o auxiliares. Se ha definido como unidad de tiempo la semana, y se ha considerado que el período a analizar ocupe 1.560 semanas (30 años).

- **VARIABLES DE STOCK**

Las variables de stock (Tabla 18 en Anexos), también denominadas variables de nivel en VenSim, son aquellas que recogen los inventarios de, en este caso, los gramos de materias primas, las unidades de componentes y las unidades de producto.

Se ha definido un volumen de recursos naturales lo bastante alto como para que no existan problemas de escasez en el modelo, la realidad es que diversos materiales presentes en los teléfonos móviles resultan difíciles de encontrar sin provocar un gran daño medioambiental y tienen un alto valor debido a la dificultad de hallarlos. Es por eso por lo que se plantea la posibilidad de colocar restricciones a los recursos naturales cuando se analicen los diversos escenarios con el fin de conocer cómo afectaría al modelo.

Para los productos en uso finalmente se ha estimado un valor entre los obtenidos en el apartado anterior, siendo este de 45.309.695 unidades. Para los productos en hibernación, se han hallado datos en estudios de mercado que estiman que en España hay actualmente 3.000.000 de móviles en los hogares sin utilizarse, aunque hay otros estudios que afirman que gran parte de la población retiene al menos 3 teléfonos móviles antiguos sin desecharlos.

Variable	Valor	Fuente
Recursos naturales	1.000.000.000.000 gramos	(Ghisolfi et al., 2017)
Productos en uso	45.309.695 uds	(ITU, 2020)
Productos en hibernación	3.000.000 uds	(Orange, 2020)

**Tabla 11:** Valores de las variables de stock que corresponden al modelo base.

Al resto de variables de nivel se les ha dado un valor inicial 0 que simplifique el problema, debido a que se desconocen posibles valores para estas variables.



- **VARIABLES DE FLUJO**

Las variables de flujo (Tabla 19 en Anexos) suponen las entradas y salidas de las variables de nivel. Se han aplicado rangos de valores para variables como la demanda (estudiada en el Capítulo 3), la tasa de descarte y de retención, y se ha utilizado la función INTEGER para garantizar que los valores obtenidos corresponden a números enteros en los casos donde se ha considerado necesario (unidades de producto y de componentes), de manera que no se puedan obtener 3.4 móviles, por ejemplo.

Estas variables deben de cubrir con la demanda prevista, por lo que algunas de ellas (tasa de adquisición, de producción de componentes y de producción de producto) producirán o no según el flujo de materiales recuperados que prevean que van a llegar al inventario en la próxima semana. No se han tenido en cuenta restricciones de capacidad para estas variables, por lo que no existirá un límite a la producción o al procesamiento de los diferentes elementos gestionados a lo largo de la cadena (residuos, productos, componentes, metales).

- **VARIABLES AUXILIARES**

Entre las variables auxiliares (Tabla 20 en Anexos) se encuentran aquellas referentes a previsiones, tiempos y porcentajes que se aplican tanto a las variables de flujo como a las de nivel. Se ha utilizado la función de suavizado exponencial SMOOTH N para que el modelo estime la demanda, los pedidos y los productos esperados antes de tomar decisiones en lo referente a la producción.

En lo referente a las variables auxiliares que corresponden con porcentajes, se han dado rangos de valores a aquellos porcentajes de los cuales se tenían datos aproximados, y se van a estudiar diversos valores discretos para aquellas variables de las que se tienen valores base provenientes de otros modelos (Bollinger, Davis, Nikolić, & Dijkema, 2012; Das & Dutta, 2013). Estos valores base se van a utilizar para observar el funcionamiento del modelo, pero no se van a considerar como reales algunos de ellos y se va a estudiar el comportamiento del modelo en diversos escenarios donde se modifiquen algunas de las variables.

Variable	Valor	Fuente
Porcentaje de retorno	95%	(Bollinger et al., 2012)
Porcentaje de recogida	Entre el 35% y el 99%, en función de la aplicación de las políticas medioambientales (Tabla 20)	(Ghisolfi et al., 2017)
Porcentaje de producto remanufacturable	65%	(Das & Dutta, 2013)
Porcentaje de eliminación	1%	(Das & Dutta, 2013)
Porcentaje de remanufactura de componentes	35%	(Das & Dutta, 2013)
Porcentaje de componentes para reutilización directa	35%	(Das & Dutta, 2013)
Tasa de descarte	35%-59%	(Sinha et al., 2016)
Tasa de retención	41%-65%	(Sinha et al., 2016)

**Tabla 12:** Valores aplicados a las variables que corresponden a porcentajes para el modelo base.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Para la cantidad de cada tipo de metal por teléfono se ha aplicado la media entre el valor más alto y el más bajo que puede encontrarse en un móvil y que se señaló en el apartado anterior.

Los valores reales de las variables de tiempo se desconocían, de manera que se han utilizado valores de modelos similares sobre RAEE dado que se ha considerado que estos valores de tiempo eran los más realistas que se podían definir (Das & Dutta, 2013; Ghisolfi et al., 2017; Sinha et al., 2016).

Con todas estas variables, se ha construido el diagrama de flujos en VenSim que se puede observar en la Ilustración 8.

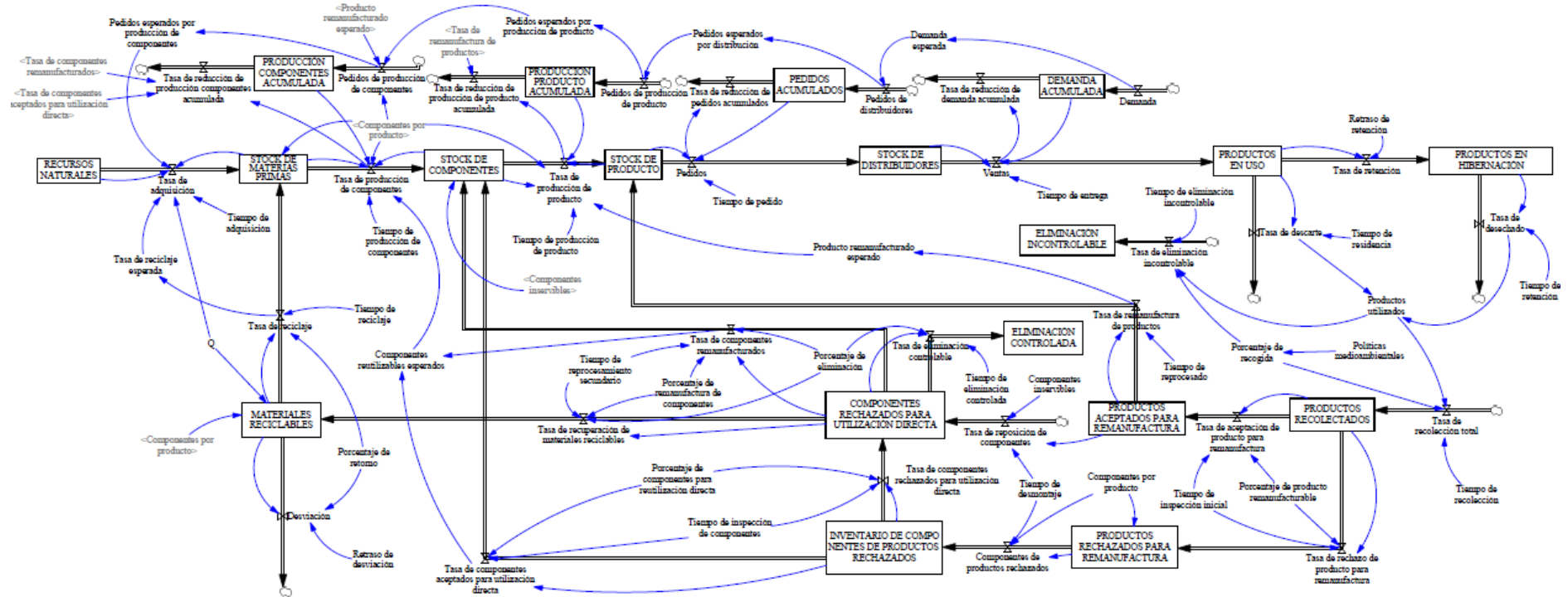


Ilustración 8: Diagrama de flujos en VenSim del modelo de la cadena de suministro de bucle cerrado de los teléfonos móviles.



#### 4.4. Evaluación de los resultados de la simulación

Con el fin de comprobar el funcionamiento del modelo, se van a analizar los tres supuestos descritos anteriormente, y se observará si existe alguna irregularidad en el modelo o en alguna de las variables.

##### 4.4.1. Supuesto 1

En este supuesto se plantea estudiar el comportamiento del modelo según el tipo de metal, y estimar el valor tanto de los metales como de los componentes recuperados. De esta manera, se realizará una estimación económica de los beneficios del proceso de recuperación, remanufactura, reparación y reciclaje.

El objetivo de este supuesto es conocer cómo afecta la variación de los costes e ingresos al beneficio obtenido por la cadena, asumiendo que el resto de las variables del problema se mantienen estables (Escenario x, realista y con mayor tasa de remanufactura de producto que de componentes). De esta manera, se pretende determinar el rango de beneficios generados por la actividad de la cadena si se dieran oscilaciones en el mercado, con el fin de conocer tanto el valor actual que produciría la actividad de la cadena como posibles valores futuros, que podrían llegar a provocar que la actividad no resultara en beneficios sino en pérdidas.

Para ello, se va a considerar que tanto el precio como el valor de los materiales por unidad de producto, es la media entre el valor mínimo y máximo. Así pues, los valores utilizados para los metales serían los siguientes:

Elemento	Material reciclable (g/móvil)	Valor del metal 21/06/20 (€/g)	
	Media	Valor €/g	Media valor metales
Cobre	11,845 g	0,0052	0,061594 €
Plata	0,3050 g	0,503	0,153415 €
Oro	0,0325 g	49,69	1,614925 €
Paladio	0,0155 g	54,058	0,837899 €
Total	12,200 g		2,667833 €

**Tabla 13:** Valores medios de la cantidad y el valor de los metales por unidad de producto.

Para establecer el valor de los componentes se ha recurrido a una página web de venta de repuestos con tutoriales para reparar el móvil (“Componentes Móvil - Tienda online de repuestos de telefonía,” 2020). Se seleccionaron 5 modelos de teléfono móvil al azar en base al número de componentes disponibles para la venta, dado que se buscaban los modelos con mayor número de repuestos por marca, de esta manera se pretendía también obtener una información lo más neutra posible, evitando aplicar costes directamente influidos por efectos locales o de marca. Tras realizar esta búsqueda, se obtuvo el valor medio del componente por modelo (Tabla 14), dado que se desconoce qué tipos de componente son los que tienen un mayor o menor porcentaje de rotura. Con todo ello, se obtuvieron los siguientes datos:



Modelo	Número de componentes	Valor total de los componentes	Valor medio de los componentes
iPhone 6	20	231.2 €	11.56 €
Samsung A5 2017	19	317.03 €	16.69 €
LG Optimus G2	18	279.21 €	15.51 €
Huawei P9	17	213.17 €	12.54 €
Sony Xperia Z5	16	228.7 €	14.29 €

**Tabla 14:** Valor y número de componentes según el modelo de móvil. Fuente: (“Componentes Móvil - Tienda online de repuestos de telefonía,” 2020).

Se ha observado que las diferencias en los valores se deben principalmente al valor de la pantalla, y que este es el elemento que se considera más diferenciador del teléfono móvil en cuanto a recambios. Otros elementos que también presentan variaciones considerables de precio son las cámaras y las baterías. Para analizar el actual escenario, se va a utilizar como valor por componente el valor medio por componente de los 5 modelos.

Así, se obtiene que un componente tendría un valor de 14,12 €, y al considerarse que cada unidad de producto posee 20 componentes, el valor de un móvil en base a sus componentes sería de unos 282,36 €. Este valor ya indica que, en diversas ocasiones, si numerosos componentes están dañados, lo más seguro es que no merezca la pena la reparación, puesto que el precio al que se venderá esa unidad en el mercado no cubrirá ni el valor de los componentes, ni los costes la recolección y reparación.

Con estos datos ya se puede conocer el valor en el mercado de los materiales y los componentes que se necesitan para fabricar nuevas unidades de producto. De esta forma se podrá estimar el ahorro para la cadena de reutilizar los componentes y materiales desechados.

Por otro lado, es necesario conocer tanto los costes de fabricación de producto, recolección, remanufactura y reciclaje; como los márgenes de los vendedores. Al desconocerse estos costes y poder obtener valores reales, se ha recurrido a revisar la literatura en busca de artículos que trataran estos costes (Bollinger et al., 2012; Das & Dutta, 2013; Geyer & Blass, 2010; Sinha et al., 2016), y dado que los valores no son actuales, se van a determinar valores tanto al alza como a la baja (+/-40%) para conocer los efectos de la variación de costes. Así pues, los valores obtenidos de la revisión de la literatura se aplicarán al Escenario 1, la estimación de la disminución de costes y aumento de beneficios en el Escenario 2 y el aumento de costes y la disminución de los beneficios en el Escenario 3 (Tabla 15).

Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Recogida y envío de producto	1,69 €	1,01 €	2,37 €
Inspección y clasificación	2,58 €	1,55 €	3,61 €
Incentivos de retorno	2,67 €	1,60 €	3,74 €
Remanufactura y reventa	1,87 €	1,12 €	2,62 €
Coste reciclaje	0,16 €	0,10 €	0,22 €
Beneficio por producto	15,14 €	21,20 €	9,08 €
Beneficio por metal (total)	2,67 €	3,74 €	1,60 €
Beneficio del cobre por unidad	0,06 €	0,09 €	0,04 €



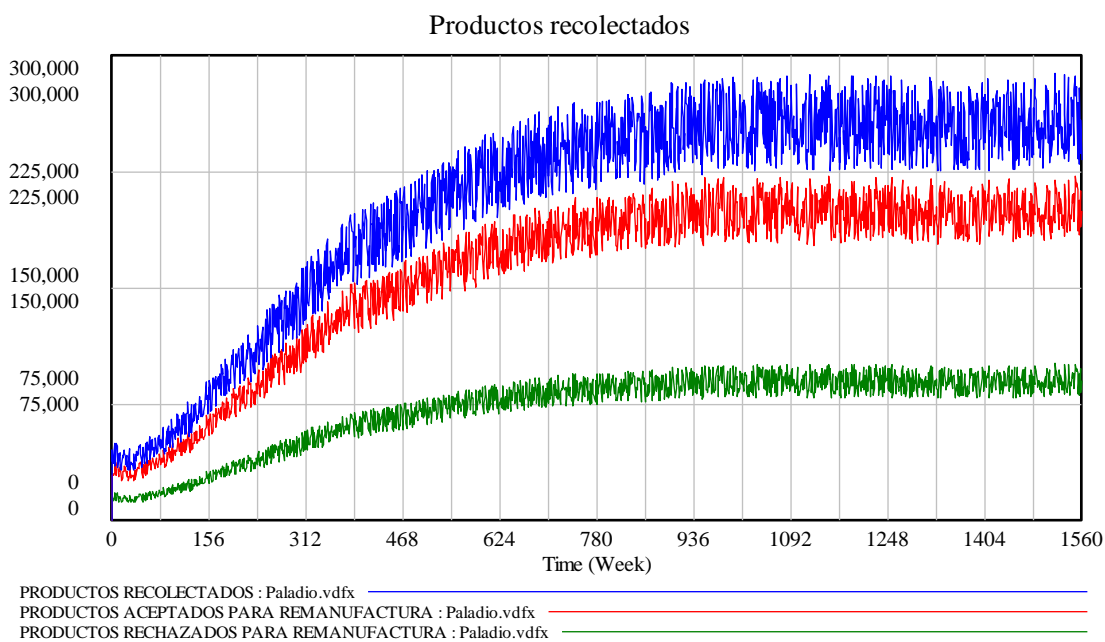
<i>Beneficio de la plata por unidad</i>	0,15 €	0,21 €	0,09 €
<i>Beneficio del oro por unidad</i>	1,61 €	2,26 €	0,97 €
<i>Beneficio del paladio por unidad</i>	0,84 €	1,17 €	0,50 €
<i>Beneficio por componente recuperado</i>	14,12 €	19,77 €	8,47 €

**Tabla 15:** *Parámetros de costes e ingresos por unidad de teléfono móvil según el escenario planteado.*

El coste correspondiente a la remanufactura equivale al proceso de reparación, no a la sustitución de los componentes dañados, por lo que el coste real de reparar un producto será la reparación más el valor de los componentes utilizados para esta remanufactura.

Para todos estos escenarios se van a aplicar las ecuaciones del modelo original (Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 de Anexos), los porcentajes de la Tabla 12 y las políticas medioambientales del escenario realista (se consigue una tasa del 100% en 20 años, para 2040).

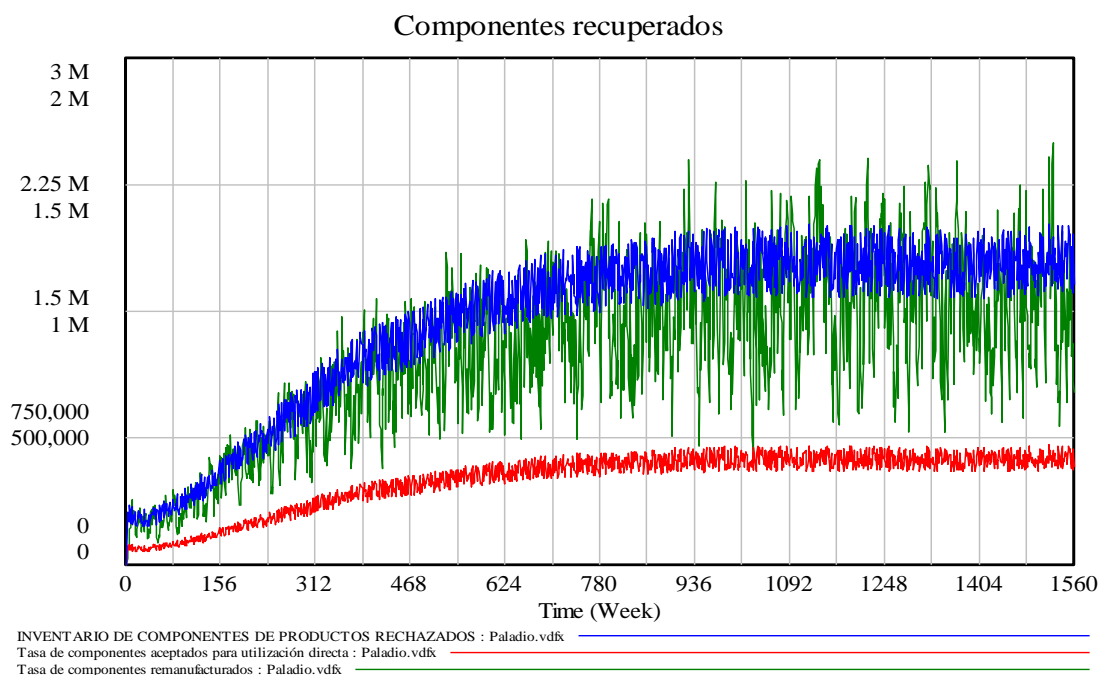
Con estos valores, se obtienen los resultados que se muestran en el Gráfico 6, que representan la cantidad de productos recolectados según se van implementando las políticas medioambientales y va evolucionando la tasa de reciclaje. Sobre estos productos recolectados (azul) se obtendrán los costes de recogida, inspección e incentivos (Gráfico 9). Los productos aceptados para remanufactura serán aquellos que se reparen (rojo – originando un gasto tanto de reparación como de consumo de componentes) y posteriormente se revendan (produciendo un beneficio). De este monto de productos recuperados existirá un porcentaje que no será apto para remanufactura (verde) y que generará gastos de desmontaje, análisis, reparación y reciclaje, para posteriormente obtener componentes aptos para el uso y materias primas.



**Gráfico 6:** *Cantidad de productos recuperados, aptos y no aptos para remanufactura, en el escenario realista.*

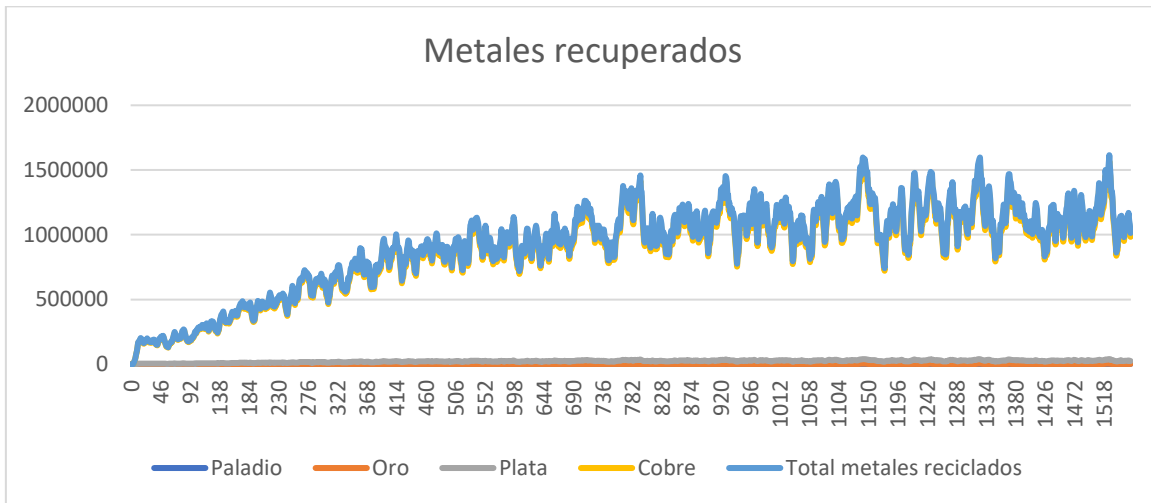


Para conocer la cantidad de componentes que se recuperan (Gráfico 7, azul) se han analizado las variables de “tasa de componentes aceptados para reutilización directa” (rojo) y “tasa de componentes remanufacturados” (verde), a estos últimos se les aplicará el coste de remanufactura, y una vez que retornen al stock de componentes todos generarán un “beneficio”, derivado del ahorro que supone a la producción recuperar ese componente y no tener ni que fabricarlo ni que consumir recursos materiales. En este gráfico también se observa el inventario de componentes de los productos que no resultaron aptos para remanufactura y directamente se desmontaron. Estos componentes deberán pasar por una segunda revisión con el fin de determinar si son aptos para reutilizarse o requieren de manipulación.



**Gráfico 7:** Cantidad de componentes aptos para remanufactura y componentes que reciben una segunda revisión, en el escenario realista.

Finalmente, para obtener el coste del reciclaje y el beneficio por los materiales recuperados de los componentes que se funden, se han desgranado los componentes entre los tipos de metales valiosos que se desean reciclar (Gráfico 8). Se puede observar como el metal predominante de los cuáles se recuperan es el cobre. En comparación, la cantidad de oro, plata y paladio presente por unidad de producto es insignificante. Hay que recordar que las cantidades de metal recuperado se han obtenido en gramos, como bien se ha señalado en otros apartados.



**Gráfico 8:** Cantidad de materiales reciclados según el tipo de metal, en el Escenario 1,2,1.

Los tres gráficos analizados del Escenario 1,2,1 (escenario base) presentan una tendencia estable en el largo plazo, una vez se han finalizado de aplicar las políticas medioambientales, por lo que se considera que el modelo está estable. Las variables parten del punto (0,0) en todos los casos, dado que para simplificar el modelo y al no disponer de los datos sobre los inventarios de la cadena inversa, los valores iniciales para todas estas variables es cero.

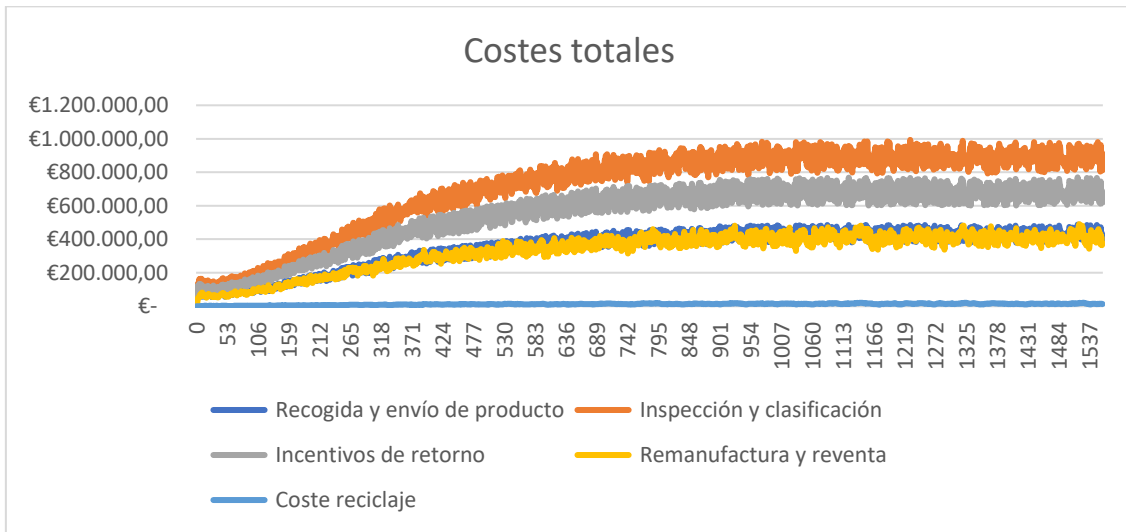
Una vez se ha analizado el comportamiento del modelo dentro del escenario realista (en el Supuesto 2 se comparará este comportamiento con los resultantes de los otros 2 escenarios), se pueden obtener los costes y los ingresos que generaría el modelo según los datos descritos al inicio de esta sección para cada escenario.

Hay que tener en cuenta, para todos estos escenarios, que estos resultados están estrechamente ligados a los porcentajes de remanufactura y reutilización directa, y que una variación en estas variables podría modificar considerablemente el modelo, como se estudiará en el Supuesto 3.

- **Escenario 1**

En este escenario se utilizan los datos de costes y beneficios obtenidos de la revisión de la literatura de modelos similares. En el Gráfico 9 se puede observar como el mayor coste proviene de la inspección y clasificación (naranja), esto puede deberse a que es una actividad que se realiza en dos ocasiones a lo largo de la cadena inversa, y supone una duplicidad que no se puede eliminar del modelo.

En el otro extremo estaría el coste de reciclaje (azul claro), que en este caso es bastante insignificante si se compara con el resto de los costes. También se observa como la recuperación y transporte del producto adopta unos valores muy similares a los de remanufactura y reventa. Como bien se ha dicho, todos estos valores siguen una clara tendencia que se mantendría en el largo plazo.

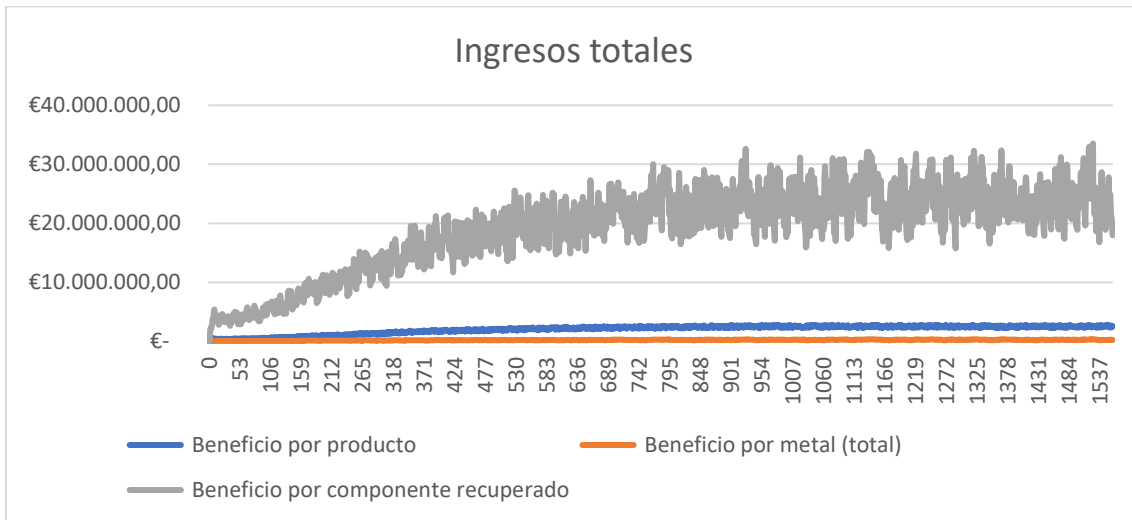


**Gráfico 9:** Costes generados por el funcionamiento de la cadena de suministro inversa, aplicando los valores del Escenario 1,2,1.

La cara contraria del modelo a los costes son los ingresos que generaría la actividad de la cadena inversa, y que están representados en el Gráfico 10. En este caso, se puede observar como el beneficio producido por la recuperación de componentes supera con creces al resto de beneficios. Esto se debe a la cantidad de componentes recuperados con los actuales parámetros del modelo, y a que se les ha aplicado un valor bastante elevado. Mientras, los beneficios por la reventa de productos resultan bastante inferiores, dado que para su remanufactura se han utilizado componentes, que como se ha comentado tienen un elevado valor.

Por tanto, se observa que la parte más ventajosa de la cadena inversa sería la recuperación de componentes que permitieran: reutilizarlos para remanufactura de productos o para fabricación de nuevos productos, o venderlos como componentes sueltos en tiendas de reparación para que los usuarios pudiesen reparar su teléfono en vez de desecharlo.

Esta última opción no es algo que los usuarios hagan generalmente en los países desarrollados, como es nuestro caso de análisis, debido a que el elevado coste tanto del componente como de la reparación provocan que la mayoría de ellos prefiera desechar el producto y comprar uno nuevo.

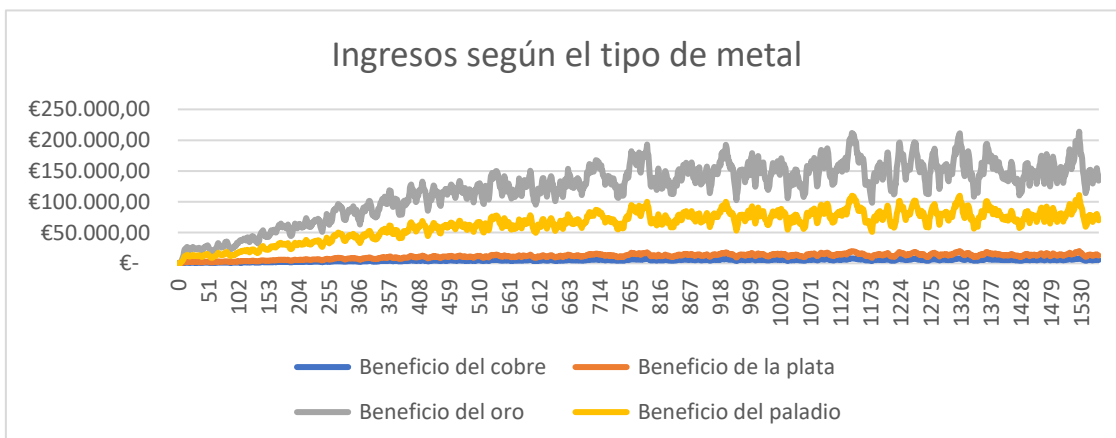


**Gráfico 10:** Ingresos generados por el funcionamiento de la cadena de suministro inversa, aplicando los valores del Escenario 1,2,1.

En cuanto a los ingresos de la venta de metales, resultan acordes con los gastos de su reciclaje, ya que si el volumen de metales no es muy alto tampoco lo pueden ser los ingresos. A pesar de esto, se ha deseado hacer un desglose de los beneficios según el metal, para poder realizar una comparación con el volumen de metal por unidad de producto visto en el Gráfico 8.

Si observamos el Gráfico 11, vemos como la relación es más bien inversa. Mientras que el cobre era con diferencia el metal que estaba más presente por unidad de producto, es el metal que genera menor beneficio, debido a que su valor en el mercado es muy inferior al del oro o el paladio. En cambio, estos últimos 2 metales que suponen 0.033 y 0.015 gramos por producto son los que generan mayor beneficio, ya que su precio en el mercado ronda los 50€ el gramo.

Esto explica por qué metales que apenas resultan significantes en el producto en cuanto a volumen son los que se recuperan de los componentes, esto, y el hecho de que resultan más difíciles de encontrar en el medioambiente y su extracción resulta costosa.



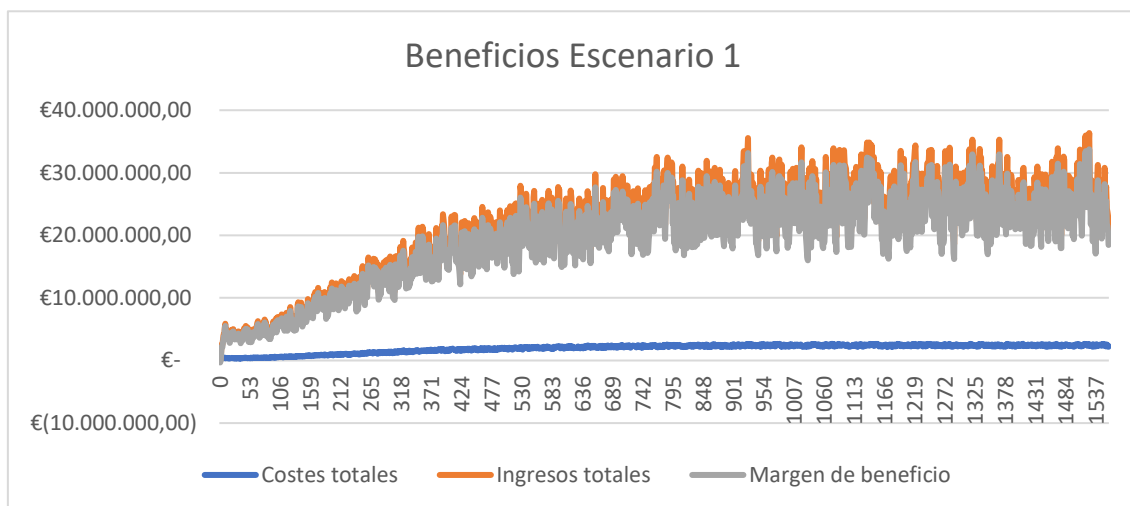
**Gráfico 11:** Ingresos generados por la venta o reutilización de los metales recuperados en el proceso de reciclaje, aplicando los valores del Escenario 1,2,1.



Finalmente, el Gráfico 12 muestra el margen de beneficio obtenido una vez se restan los costes totales a los ingresos. Se espera, de no haber variaciones en ninguna de las variables, que la cadena genere unos 25.000.000€ de beneficio semanalmente. Como bien se ha comentado, la mayor parte de estos ingresos provendría del valor de los componentes recuperados, por lo que el beneficio devendría del ahorro en recursos productivos.

Este beneficio puede resultar elevado, pero si se supone un valor medio de venta de producto de 300€, y unas ventas de 500.000 de unidades semanales, se estarían recuperando un 16,67% del valor del producto una vez éste es desechado.

Hay que tener en cuenta que, al no considerarse restricciones de capacidad, es muy probable que parte de estos beneficios debieran de reinvertirse en diversos puntos de la cadena para aumentar la capacidad de recogida y de tratamiento de los residuos, sobre todo durante los 10 primeros años, donde se produce el mayor crecimiento.



**Gráfico 12:** Beneficios generados por el funcionamiento de la cadena de suministro inversa, aplicando los valores del Escenario 1,2,1.

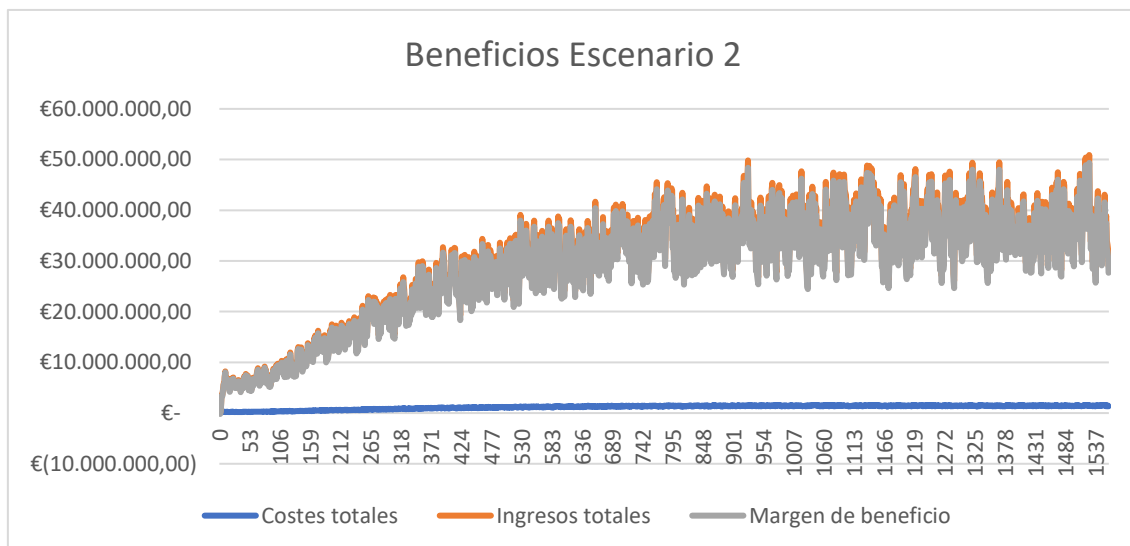
- **Escenario 2**

En este escenario, se ha estudiado qué valores generaría el modelo si debido a una mejora de la gestión de la cadena y a un repunte del valor de lo móviles, los costes de la gestión de los residuos disminuyeran y los beneficios por los productos, materiales y componentes aumentarían.

El resultado ha sido que, al haberse variado todos los valores un 40% (al alta o a la baja), el esquema de los costes e ingresos, en cuanto a cuáles tienen un mayor impacto sobre el total no ha sufrido ninguna variación. Esto es debido a que las unidades que se han tratado continúan correspondiendo a un escenario realista en cuanto a la aplicación de las políticas medioambientales, y los valores correspondientes a variables porcentuales tampoco han sido modificados.

Por ello, los únicos cambios respecto al escenario 1 son las tendencias de los costes e ingresos totales, como se puede observar en el Gráfico 13. El aumento del valor de los residuos recuperados, y la disminución de los costes de procesar estos residuos, conlleva un aumento del margen de beneficio. Es lógico asumir que este aumento se debe en parte a que la subida del valor de los residuos está directamente relacionada con un aumento del valor de los productos nuevos y de los costes de fabricación de estos productos. Por tanto, es asumible que, si aumenta un 40% el valor de los residuos recuperados, también lo hace el valor del precio de venta de los productos nuevos, que pasaría a ser al menos de 420€.

Si no se produjera un aumento del precio de venta de los nuevos productos, debido a alguna estrategia de ventas, dado que en este escenario 2 los beneficios rondan los 35.000.000€, esto supondría recuperar el 23,33% del producto.



**Gráfico 13:** Beneficios generados por el funcionamiento de la cadena de suministro inversa, aplicando los valores del Escenario 2,2,1.

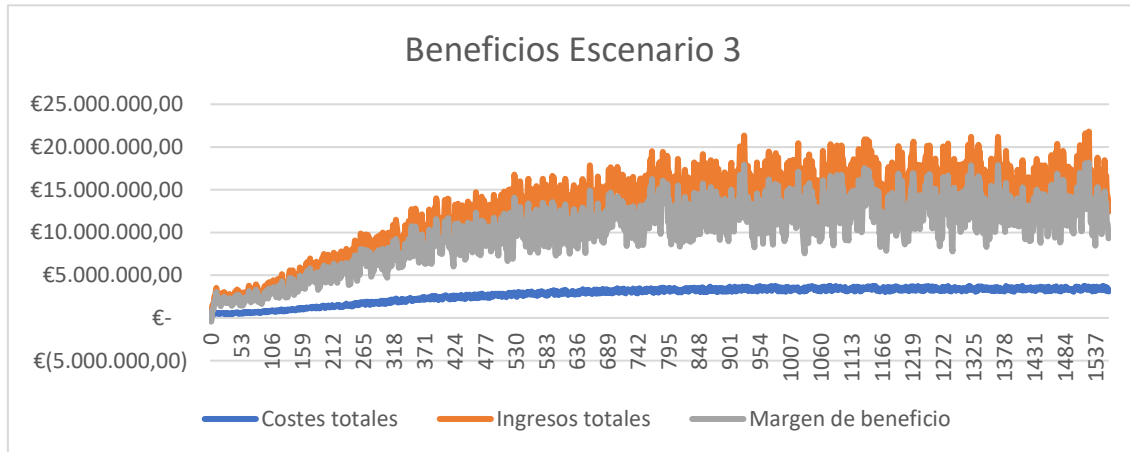
- **Escenario 3**

En este escenario, se ha estudiado qué valores generaría el modelo si se diera una peor gestión de la cadena y a una bajada del valor de los móviles, debida por ejemplo a una saturación en el mercado de producto, los costes de la gestión de los residuos aumentarían y los beneficios por los productos, materiales y componentes disminuirían.

Como ocurría en el Escenario 2, al haberse variado todos los valores un 40% (al alza o a la baja), el esquema de los costes e ingresos, en cuanto a cuáles tienen un mayor impacto sobre el total no ha sufrido ninguna variación.

Por ello, los únicos cambios respecto a los escenarios anteriores son las tendencias de los costes e ingresos totales, como se puede observar en el Gráfico 14. La caída del valor de los residuos recuperados, y el aumento de los costes de procesar estos residuos, genera una bajada del margen de beneficio. La pérdida del valor de los residuos se asocia con la bajada del valor de los productos, y se espera que también de los costes de fabricación.

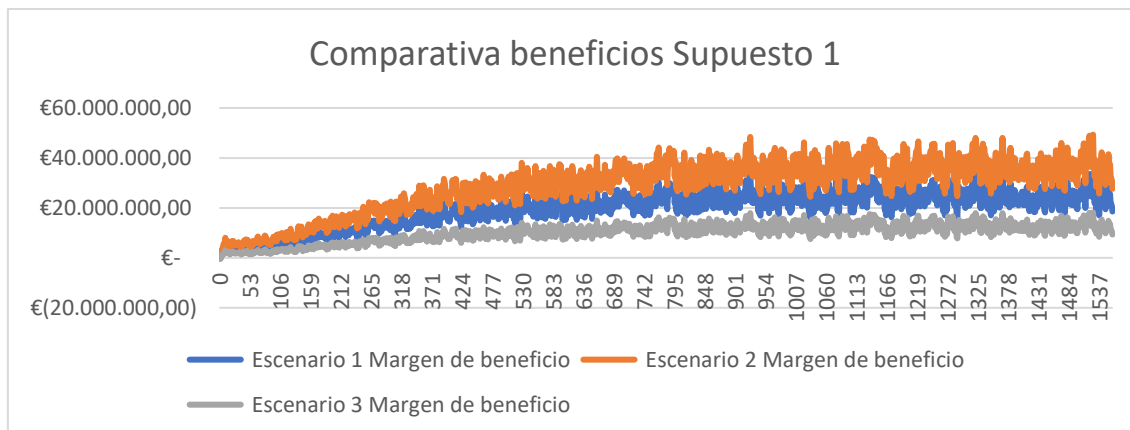
Si no se produjera la disminución del precio de venta de los nuevos productos, dado que en este Escenario 3 los beneficios rondan los 12.500.000€, esto supondría recuperar únicamente el 13,89% del valor del producto.



**Gráfico 14:** Beneficios generados por el funcionamiento de la cadena de suministro inversa, aplicando los valores del Escenario 3,2,1.

- **Conclusiones del Supuesto 1**

Es este supuesto se ha comprobado como la variación de los costes e ingresos provocan oscilaciones en los beneficios, pero estos en todo momento son positivos (Gráfico 15). La tendencia en el peor de los escenarios (Escenario 3,2,1) es de mínimo 10 millones de euros recolectados semanalmente, frente a la del mejor de los escenarios (Escenario 2,2,1) que en ocasiones llega a rozar los 50 millones de euros de beneficio.



**Gráfico 15:** Comparativa de los beneficios obtenidos en los 3 escenarios del Supuesto 1.

Este margen de entre 20 y 40 millones de euros semanales afecta gravemente a la cadena, dado que es resulta de una diferencia significativa a la hora de realizar inversiones en la cadena para obtener mejoras (de productividad, capacidad, reducción de tiempos, etc.), y en el peor de los escenarios puede llegar a ser insuficiente para afrontar otros costes que no se hayan contemplado en este supuesto debido a la falta de datos.



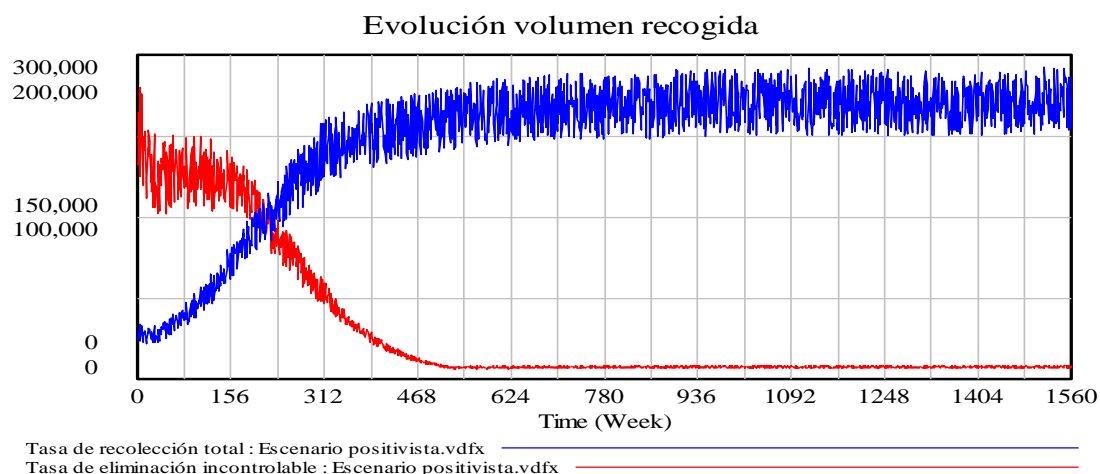
#### 4.4.2. Supuesto 2

En este supuesto se pretende analizar cómo afecta la implantación de las políticas medioambientales explicadas en el Capítulo 3 al modelo. Para ello, se van a utilizar los valores del Escenario 1 del Supuesto 1, y se va a variar únicamente la tasa de recogida a través de la velocidad de implantación de las políticas medioambientales.

El objetivo es conocer el volumen de residuos que llegan a recuperarse en cada uno de los escenarios, así como el volumen final de desechos eliminados de manera incontrolada. También se desea analizar si en todos los escenarios es posible cubrir con la demanda y las variaciones que deben darse en la variable de producción para poder cumplir con esta.

- **Escenario Positivista: Se alcanzan los objetivos en 2030.**

En este escenario, se consiguen alcanzar los objetivos en el plazo previsto, de manera que en 2030 la tasa de recogida ronda el 100% y no existen casi RAEE que se eliminen de manera incontrolada (Gráfico 16). La actividad de la cadena de suministro inversa aumenta sobre todo los primeros 10 años para después mantenerse estable, por lo que se procesan un mayor número de productos a lo largo del periodo analizado.

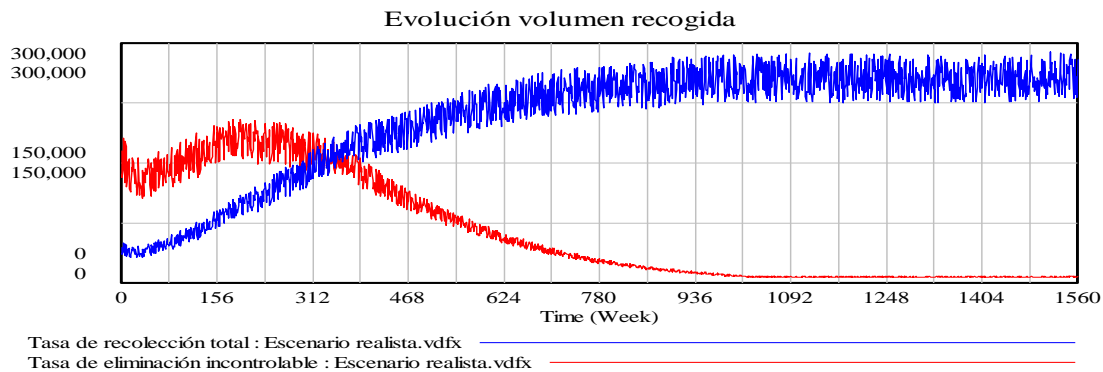


**Gráfico 16:** Evolución del volumen de productos recolectados en el Escenario 1,1,1.

- **Escenario Realista: Se alcanzan los objetivos en 2040.**

Este escenario es el equivalente al comentado en el Supuesto 1. Siguiendo con el retraso existente en cuanto a la consecución de los objetivos de reciclaje, se considera que no se implementan las políticas medioambientales en el plazo previsto y la tasa de reciclaje del 100% no se alcanza hasta 2040. Se puede observar en el Gráfico 17 como la pendiente de la tasa de recolección es menos pronunciada a la del escenario positivista, y cómo los residuos que se eliminan de manera incontrolada tardan unos 10 años más en tender a cero, lo cual supone un mayor volumen de residuos no reciclados que contaminan el medioambiente.

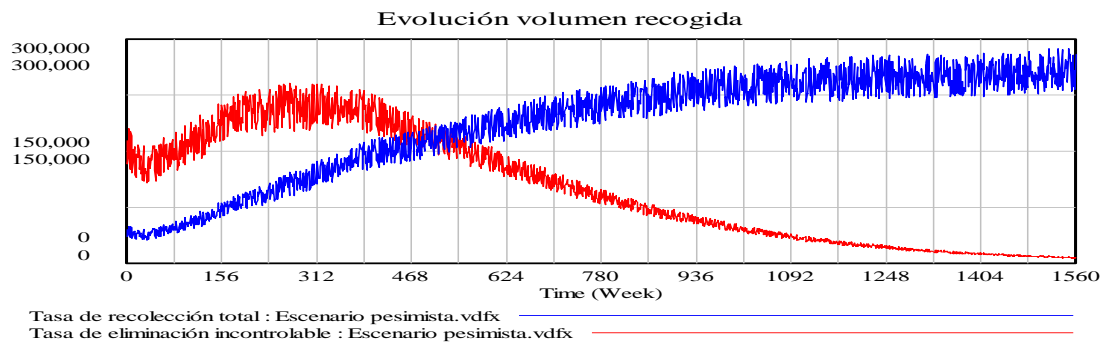




**Gráfico 17:** Evolución del volumen de productos recolectados en el Escenario 1,2,1.

- **Escenario Pesimista: Se alcanzan los objetivos en 2050.**

El escenario pesimista corresponde al peor de los escenarios posibles, dado que las políticas medioambientales tardan 30 años en aplicarse correctamente, al igual que la tasa de reciclaje en llegar al 100%. En el Gráfico 18 la tendencia de las tasas es mucho menos visibles que en los otros escenarios, y esto se debe a que será a partir de 2050 cuando se establezca el número de productos reciclados. Este escenario supone que la cantidad de productos que se eliminan de manera incorrecta en lugar de reutilizarse sea 3,36 veces mayor a la del escenario positivista, lo cual supone un valor bastante significativo en cuanto términos medioambientales.

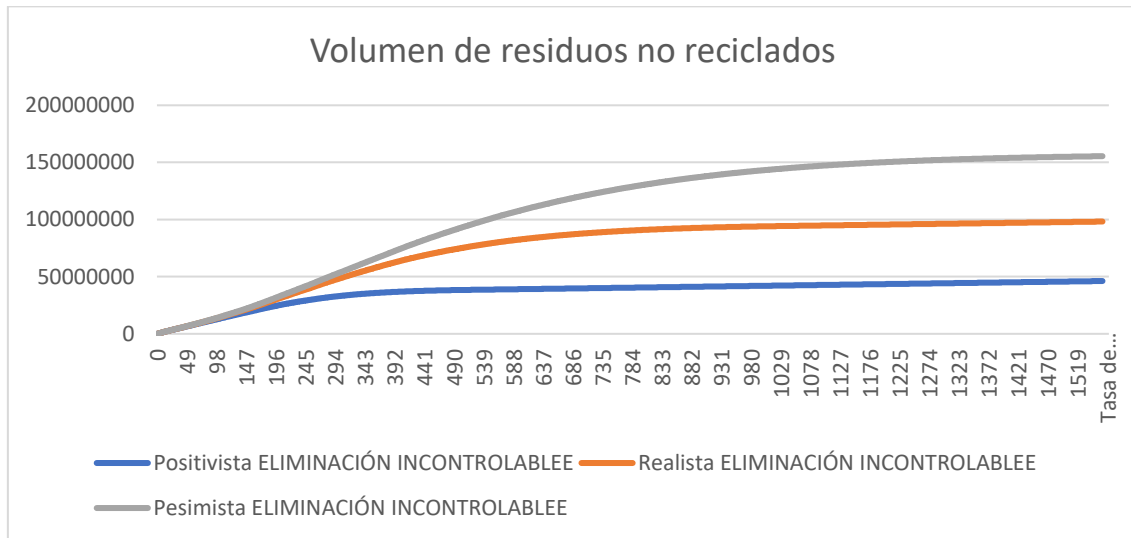


**Gráfico 18:** Evolución del volumen de productos recolectados en el Escenario 1,3,1.

- **Comparativa escenarios Supuesto 2**

En este apartado se desea realizar una comparativa entre los 3 escenarios descritos anteriormente.

Se ha observado cómo las políticas medioambientales influyen principalmente en la posibilidad de reducir los desechos eliminados incorrectamente (Gráfico 19), lo cual supone un aspecto importante para la sostenibilidad medioambiental. Se puede observar cómo en el largo plazo de un escenario a otro el volumen final de residuos eliminados incorrectamente puede llegar a duplicarse o triplicarse. Estos residuos suelen acabar en buques que los trasladan a países en desarrollo, los cuáles se utilizan como vertedero para los RAEE. Estos países no disponen de las infraestructuras necesarias para su tratamiento, por lo que se desperdicia gran parte de los materiales y se producen mayores vertidos derivados de la mala eliminación de estos residuos.



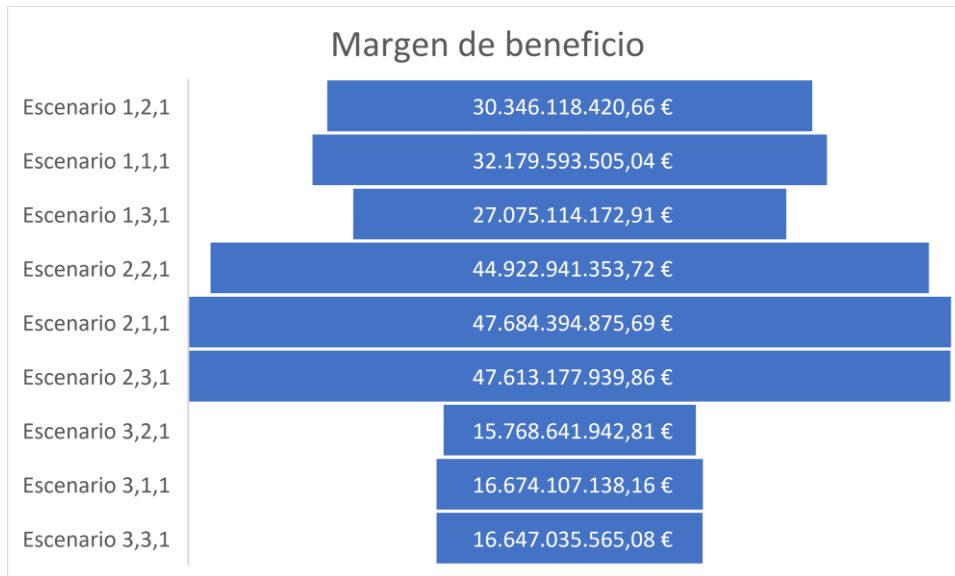
**Gráfico 19:** Volumen de residuos no reciclados según el nivel de aplicación de las políticas medioambientales.

También se ha realizado una comparación de las variables relacionadas con la producción de nuevos productos en la cadena directa, con el fin de analizar hasta qué punto la reutilización de materiales reduce las tasas de fabricación. En la Tabla 16 se observa cómo las tasas de adquisición y producción aumentan conforme el escenario presenta una peor tasa de reciclaje, pero que aun así las ventas finales son prácticamente las mismas en los tres escenarios.

Variables/Escenarios	Positivista	Realista	Pesimista	Magnitud
<b>Tasa de adquisición</b>	12.086.396,76	12.431.535,78	12.685.170,97	gramos
<b>Tasa de producción de componentes</b>	3.911.461.912	4.262.943.412	4.643.352.117	componentes
<b>Tasa de producción de producto</b>	587.410.982	604.301.754	622.685.813	unidades
<b>Pedidos</b>	810.497.188	810.497.186	810.497.243	unidades
<b>Ventas</b>	809.981.999	809.981.997	809.982.043	unidades

**Tabla 16:** Producción y ventas de la cadena directa en los 3 escenarios.

Esto demuestra que en el escenario positivista se recupera un volumen de materiales (sobre todo de componentes) bastante superior que en el escenario pesimista. Esto debería de conllevar una reducción de los costes de fabricación que aportarían un mayor beneficio al conjunto de la cadena, como bien se observa en Gráfico 20, donde el escenario positivista siempre presenta mayores beneficios para los 3 conjuntos de valores (escenarios) analizados en el apartado anterior.



**Gráfico 20:** Margen de beneficio de la cadena según la combinación de escenarios.

Se puede apreciar cómo la diferencia de uno a otro escenario con es muy significativa, pero si sumas el beneficio económico con el beneficio medioambiental, queda claro que una rápida adopción de las políticas medioambientales incurriría en mayores ingresos y en menor huella ecológica.

El aumento de la tasa de reciclaje también conduciría a la necesidad de aumentar la capacidad de la cadena, como se ha comentado anteriormente, de manera que se necesitarían más trabajadores y se invertiría más en tecnología e infraestructura. Todo esto supondría un beneficio social, ya que se crearían numerosos puestos de trabajo y se reducirían los peligros derivados de la mala eliminación de los RAEE.

#### 4.4.3. Supuesto 3

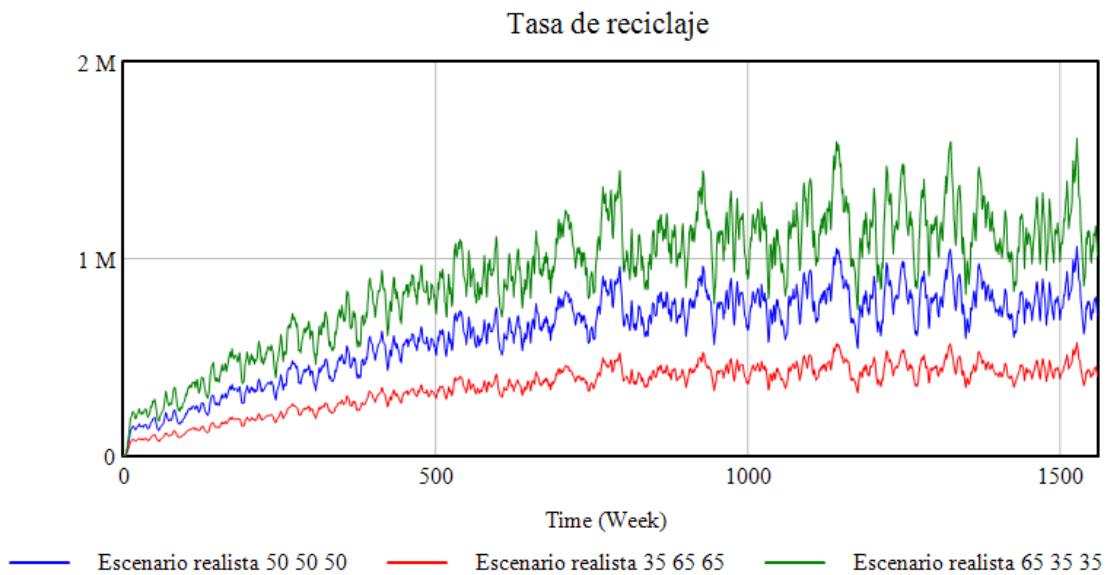
En este supuesto se desea analizar la influencia de ciertas variables porcentuales al modelo, de manera que se conozca qué procesos aportan más valor a la cadena, cómo se consigue una mejor gestión de los pedidos y los volúmenes de trabajo que se deberían de realizar, según se reutilicen un mayor porcentaje de productos, de componentes o esté equilibrado.

Para ellos, se van a aplicar 3 valores discretos (35%, 50%, 65%) a 3 variables (“porcentaje de remanufactura de componentes”, “porcentaje de producto remanufacturable” y “porcentaje de componentes para reutilización directa”) (Tabla 17). El resto de los valores que se aplicarán al modelo serán los correspondientes al Escenario 1 realista.

	% rem. producto	% rem. componentes	% comp. reutilizables
Simulación 1	0.65	0.35	0.35
Simulación 2	0.35	0.65	0.65
Simulación 3	0.5	0.5	0.5

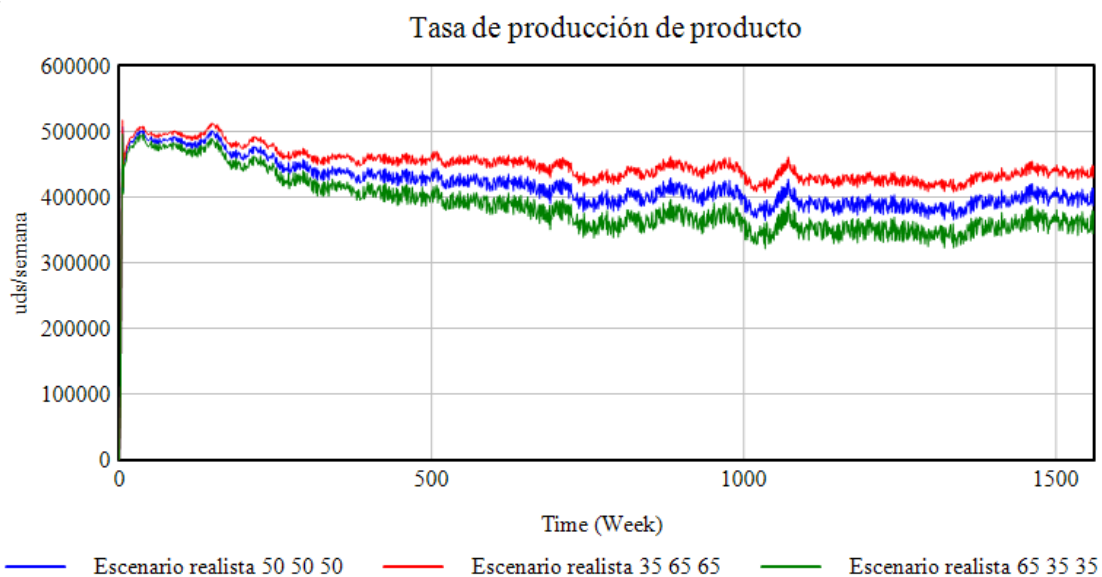
**Tabla 17:** Simulaciones variando los porcentajes de las variables de reutilización y remanufactura.

Tras realizar estas simulaciones, se ha podido comprobar que el modelo reacciona de manera lógica, ya que unas menores tasas de reutilización y remanufactura de componentes suponen que estos se reciclen para recuperar las materias primas, aumentando así tanto la tasa de reciclaje (Gráfico 21) como los costes asociados a ésta.



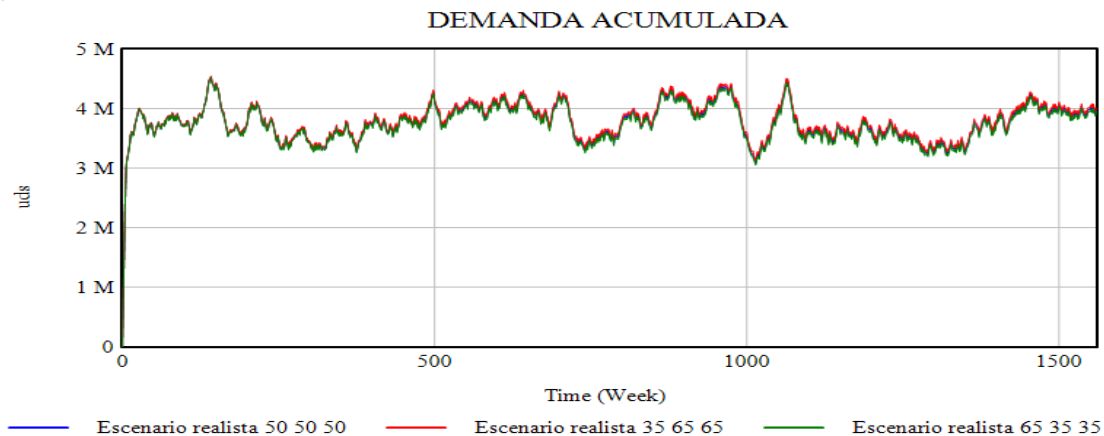
**Gráfico 21:** Tasa de reciclaje en el Escenario 1 realista, efectuando las 3 simulaciones.

Siguiendo esta misma tendencia, se observa cómo los escenarios con mayores porcentajes de remanufactura de producto inducen a una disminución de la producción de producto (Gráfico 22). Lo mismo sucede con la producción de los componentes, donde los escenarios con mayor porcentaje de recuperación de componentes suponen una menor tasa de fabricación.



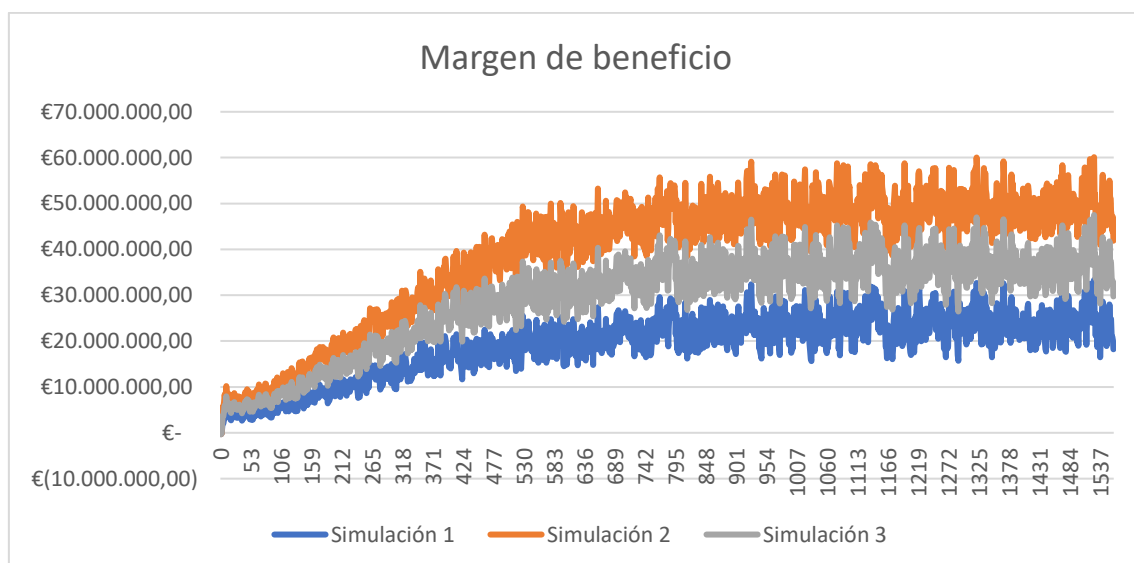
**Gráfico 22:** Tasa de producción de producto en el Escenario 1 realista, efectuando las 3 simulaciones.

Por otro lado, mientras que las variables relacionadas con la producción de nuevos productos y con la gestión de los residuos presentan variaciones según el escenario, la demanda acumulada presenta siempre los mismos valores, de manera que en cualquiera de estos escenarios se cubriría de la misma manera. Se observa como la tendencia a largo plazo correspondería a la demanda producida a lo largo de dos meses, que es plazo que corresponde con el lead time de la cadena (Gráfico 23).



**Gráfico 23:** Evolución de la demanda acumulada según la simulación procesada.

Así pues, tras realizar las tres simulaciones de este supuesto y estudiar su comportamiento, se ha procedido al cálculo de los beneficios que genera cada una de ellas. El Gráfico 24 muestra cómo cuanto mayor es la tasa de recuperación de componentes, mayores son los beneficios. Esto se debe a que según los datos que se han obtenido en la Tabla 15, la recuperación de componentes sería el factor que supondría un mayor margen de beneficio para la cadena, dado que su valor resulta ser elevado aun cuando el modelo de móvil es algo antiguo.



**Gráfico 24:** Beneficios obtenidos para cada simulación, según la variación de los porcentajes.



Esto no sucede con los teléfonos móviles que se recuperan, ya que es necesario sustituir componentes defectuosos, repararlos y su precio de venta en el mercado puede llegar a resultar bastante inferior al de un modelo nuevo. En cambio, se ha considerado que los componentes recuperados pueden resultar ser más aprovechables, tanto para reparar modelos antiguos, como para venderlos como repuestos o incorporarlos a nuevos productos con ligeras modificaciones.

Estas simulaciones se han realizado para el Escenario 1 realista, pero tras haber analizado las tendencias del resto de conjunto de escenarios, se podría realzar una estimación del comportamiento de estas 3 simulaciones en cualquiera de ellos.

De manera que se conoce que la combinación del Escenario 2, en un entorno positivista y aplicando los porcentajes de la simulación 2 (Escenario 2,1,2), sería la que produciría un mayor beneficio para la cadena. Mientras que el Escenario 3, en un entorno negativista y aplicando los porcentajes de la simulación 1 (Escenario 3,3,1) retornaría los peores valores posibles.

#### 4.5. Validación del modelo

A lo largo del apartado anterior, durante la ejecución de los diferentes escenarios, se ha comprobado cómo el modelo respondía a una serie de pautas lógicas y la variación de una de las variables afectaba de manera proporcionada a las dependientes de ella. Aun así, para garantizar el buen funcionamiento del modelo, se va a realizar una serie de tests que validen que estos resultados no se han generado de manera casual, sino que el diseño del modelo resulta coherente. Estos son:

1. Test de idoneidad de los límites del modelo: se debe de garantizar que todos los elementos presentes en el modelo se correspondan a un ejemplo de cadena de suministro de móviles en el mundo real.

Bien es cierto que el modelo no contempla el 100% de los elementos de la cadena, puesto que se ha realizado una simplificación acorde con los datos disponibles que se tenían del modelo, pero se considera que se han incorporado todos los elementos conocidos de una cadena de suministro de circuito cerrado, con el fin de crear una representación fiel a la realidad del sector, por lo que se considera que se supera el test.

2. Test de consistencia dimensional: se ha garantizado que las magnitudes de las variables con consistentes, esto significa que las unidades de medida que se han introducido en el modelo son las correctas.

Para ello, se ha empleado la herramienta de VenSim “Revisar Unidades”, la cual devolvió un mensaje de que había hallado 39 errores entre las 90 ecuaciones que analiza del modelo. Tras analizar el problema, se observó que se debía a que el programa realiza la integración de las variables con las magnitudes en inglés; de manera que al introducir la magnitud “Componentes/semana”, el programa aún consideraba que tenía que partirlo por “week”. Tras revisar todos los errores y las magnitudes aplicadas, se comprobó que éstas eran correctas en todas las variables, por lo que se considera que se supera el test.

3. Test de parámetros utilizados: se van a validar las fuentes de las cuáles se han obtenidos los valores utilizados a lo largo del modelo.

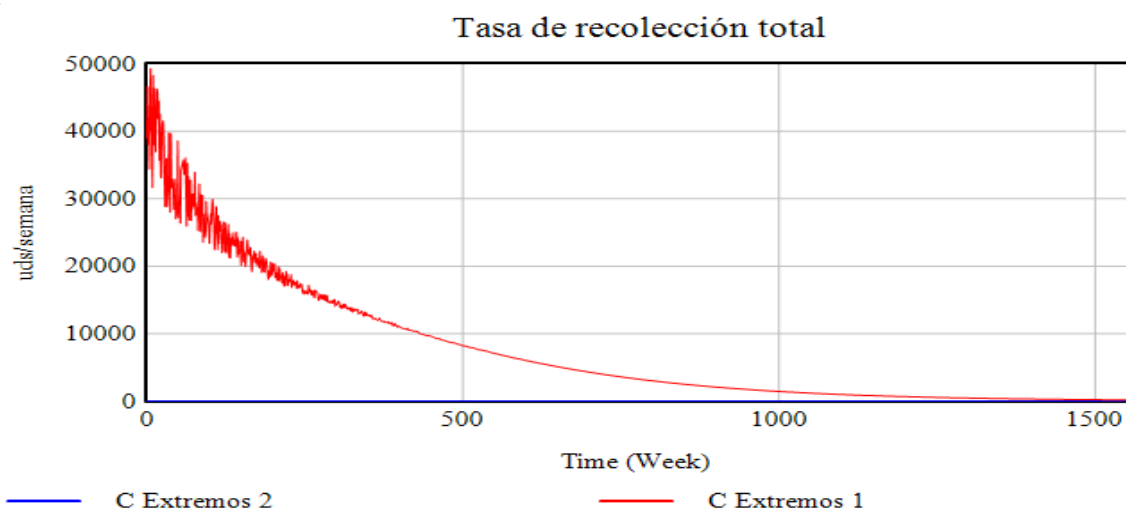
Para el diseño de este modelo, se han utilizado como ejemplo diversos modelos analizados en la revisión literaria que se correspondían con la gestión de RAEE (Bollinger et al., 2012; Das & Dutta, 2013; Geyer & Blass, 2010; Sinha et al., 2016) y se han analizado diversos informes de organizaciones de Naciones Unidas, del Estado y consultoras para conocer las políticas aplicables al modelo, la evolución de la gestión de residuos y los valores del sector en España (Baldé; C. P.; Forti; Gray; Kuehr; P.; R.; Stegmann; V., 2017; Kantar Worldpanel & Guenveur, 2017; MINISTERIO DE AGRICULTURA ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2015) , por lo que se considera que se supera el test.

4. Test de condiciones extremas: se pretende observar el comportamiento del modelo si se dieran condiciones extremas, para observar si continúa mostrando un comportamiento lógico.

Si se eliminara la demanda del modelo (demanda = 0), las tasas de producción de la cadena directa desaparecerían, por lo que la cadena inversa únicamente trataría los residuos de los productos que están en uso en el momento inicial. Los inventarios de la cadena directa únicamente dispondrían de las unidades recuperadas de la cadena inversa, y una vez que se hubieran procesado todos los materiales, los inventarios permanecerían estables en el tiempo.

Si ningún usuario desechara su móvil una vez deja de utilizarlo, y los guardarán en casa, la actividad de la cadena inversa sería inexistente, al igual que los residuos eliminados de manera incorrecta, y la falta de retornos aumentaría las tasas de producción de la cadena directa.

Estos argumentos se ven representados de manera correcta en el Gráfico 25, por lo que se considera que se supera el test.



**Gráfico 25:** Tasa de recolección en condiciones extremas, sin demanda (CE1) y sin desechado (CE2).





5. Test de error de integración: esta prueba pretende comprobar si una modificación en la unidad de tiempo empleada provoca variaciones en el modelo.

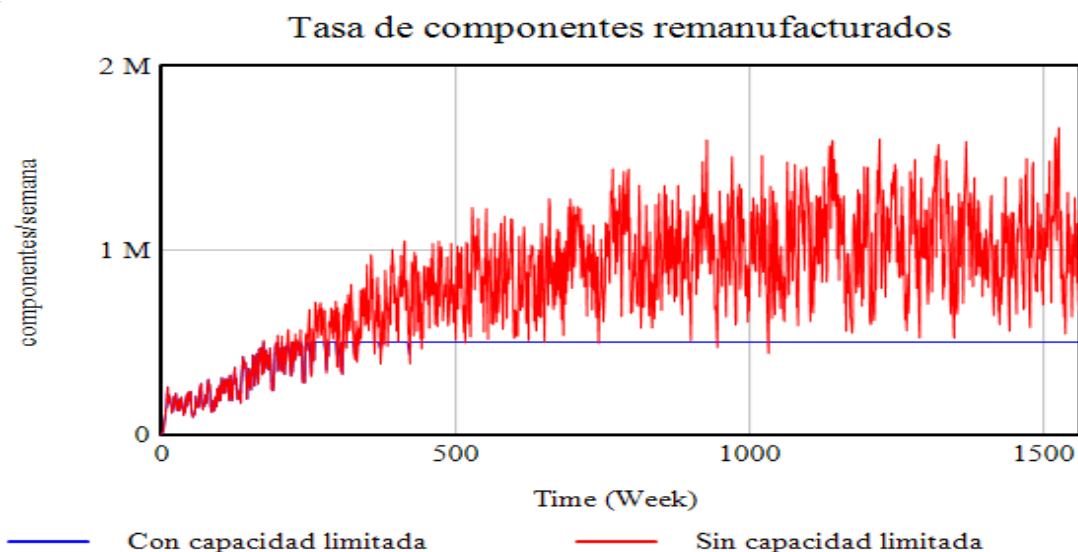
Se ha cambiado la unidad de tiempo, primero de semanas a años y luego a minutos, y se ha vuelto a realizar la simulación, obteniendo los mismos valores para todas las variables del modelo en los 3 casos. Esto se debe en parte a que el programa no ha considerado las unidades de tiempo definidas, en el caso de haberlas descrito en su lenguaje y haber realizado los cambios, se hubieran producido diferencias.

#### 4.6. Mejoras del modelo

Debido a la generalidad del modelo, que no se ajusta a ningún caso concreto en cuanto a que existen cadenas inversas como la descrita y cada una contiene unas peculiaridades y unos parámetros para las variables definidas, resulta más complicado proponer una mejora.

Como bien se ha comentado durante el desarrollo de este trabajo, no se han considerado ni las restricciones de capacidad de procesamiento ni variables de reinversión de los beneficios en la cadena para aumentar esta capacidad si se llegara al límite. Al no disponerse de datos reales, no han sido variables introducidas en el modelo original, pero en este apartado se va a incorporar un límite de capacidad al procesamiento de componentes, puesto que se ha observado que son los materiales que reportan mayores beneficios.

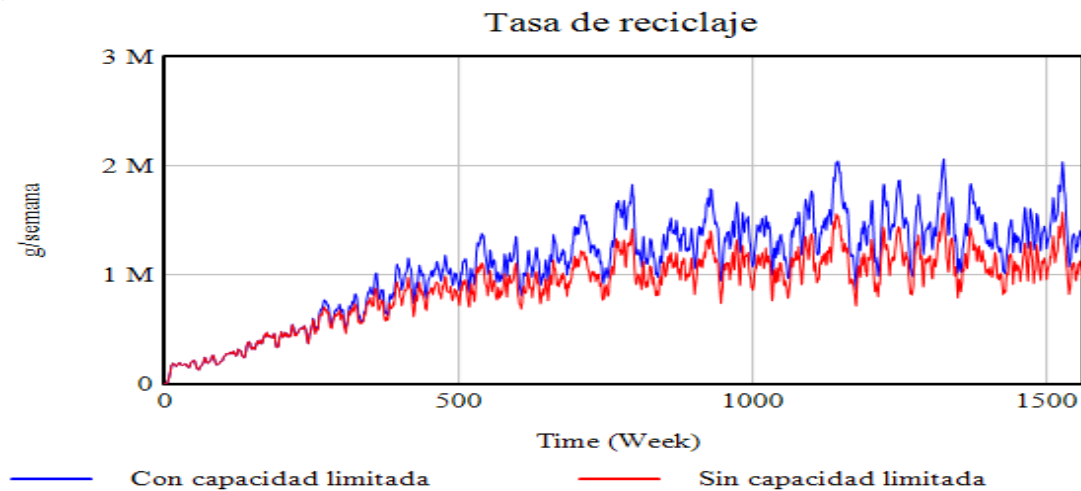
Así pues, se ha incluido una variable auxiliar denominada “capacidad de remanufactura” que afecta únicamente a la tasa de remanufactura de componentes. Se ha aplicado un valor a esta nueva variable de 1.000.000 de capacidad, y la fórmula de la variable afectada se ha modificado para que contemple esta variable:  $\text{INTEGER}(\text{MIN}(\text{COMPONENTES RECHAZADOS PARA UTILIZACIÓN DIRECTA} * (1 - \text{Porcentaje de eliminación}) * \text{Porcentaje de remanufactura de componentes}, \text{Capacidad de remanufactura}) / \text{Tiempo de reprocesamiento secundario})$ . De esta manera, no se remanufacturarán más componentes que la capacidad estipulada, como se observa en el Gráfico 26.



**Gráfico 26:** Tasa de componentes remanufacturados con y sin límite de capacidad.

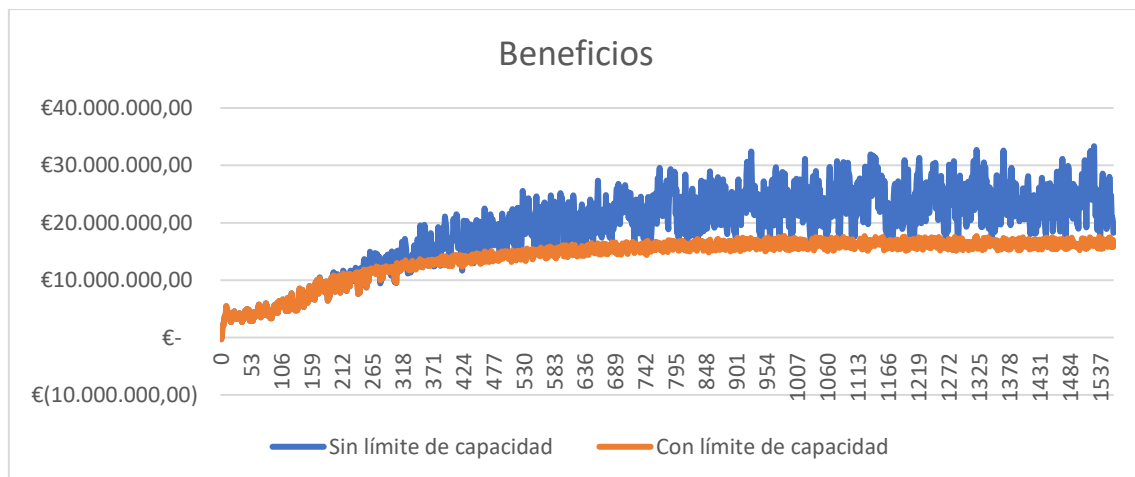


En este gráfico se puede ver cómo se alcanza el límite de capacidad, impidiendo que se continúen remanufacturando más componentes y manteniendo la remanufactura al 100% de capacidad a partir del quinto año, de manera que se debería de realizar una inversión para aumentar la capacidad máxima y poder aprovechar todos esos componentes, que de otra manera pasan a formar parte del inventario de materiales a reciclar, dado que el modelo considera que no puede acumular tantos componentes sin procesar en su inventario. De esta manera, los componentes que no se remanufacturan pasan a reciclarse, aumentando así la tasa de reciclaje del modelo, como bien puede verse en el Gráfico 27.



**Gráfico 27:** Variación de la tasa de reciclaje según si existe o no límite de capacidad para remanufactura de componentes.

La disminución de los componentes que se recuperan para la cadena directa y el aumento de los metales recuperados provoca que la tasa de componentes aumente, pero no que la tasa de adquisición de metales disminuya, ya que ésta ya se encontraba en 0 al poseer la cadena materiales suficientes para el proceso productivo sin tener que recurrir a la extracción de recursos, según los resultados del modelo.



**Gráfico 28:** Beneficios de la cadena para la simulación 1, del Escenario 1 realista, con y sin límite de capacidad de remanufactura de componentes.



Como ya se esperaba, dado que los componentes son los materiales que poseen mayor valor dentro del modelo, al reciclarlos y extraerles los metales debido a la falta de capacidad de remanufactura, se están perdiendo ingresos que incurren en un beneficio muy inferior al del modelo sin límite de capacidad (Gráfico 28). Mientras que en el modelo sin límites los beneficios semanales rondaban los 25.000.000€, en el modelo limitado éstos apenas sobrepasan los 15.000.000€ semanales. Es por ello por lo que, en una situación real, la cadena invertiría parte de sus beneficios en aumentar la capacidad hasta que no estuviera limitada, de manera que no se perdieran ingresos de la gestión inversa de la cadena.

#### 4.7. Conclusiones del modelo

Tras haber finalizado el diseño y análisis del modelo, se puede concluir lo siguiente sobre el mismo:

- Se han alcanzado los objetivos del apartado, que consistían en la elaboración de una serie de supuestos que permitieran el análisis del funcionamiento y los beneficios generados por la cadena aplicando una serie de variaciones a ciertas variables.
- Se ha comprobado cómo una rápida y correcta implantación de las políticas medioambientales descritas aumenta el volumen de residuos recuperados mejorando el beneficio de la cadena, y disminuye el volumen de residuos eliminados sin control, lo cual resulta considerablemente beneficioso para el medioambiente.
- Se ha visto que la variación en los porcentajes de remanufactura y de componentes aptos para reutilización directa, tiene un gran efecto sobre los ingresos, ya que los componentes son los materiales que aportan un mayor volumen de ingresos a la cadena según los parámetros que se han aplicado al modelo.
- Se ha validado el modelo, de manera que se garantiza la lógica del efecto de unas variables sobre otras, y del funcionamiento del modelo en general.
- Se ha comprobado el efecto de la limitación a la capacidad en el modelo, demostrando que, de existir este límite en la cadena, lo idóneo sería invertir en aumentar la capacidad total con el fin de no perder ingresos provenientes de la actividad de la cadena.
- Se ha comprobado de esta manera que el modelo cumple con el objetivo de la triple sostenibilidad, dado que existe un beneficio económico proveniente de la actividad de la cadena; la recogida de los residuos reduce la contaminación medioambiental; y el aumento de la tasa de recogida, remanufactura y reciclaje provoca que se deba de aumentar la capacidad, tanto de los recursos humanos como de las instalaciones, además de una mejora de las tecnologías aplicadas, incurriendo así en una mejora social debida a la generación de empleo.



Sobre el modelo en sí, se han podido obtener los siguientes resultados:

- Se ha visto cómo de esencial puede llegar a ser la gestión de pedidos en la cadena de suministro inversa, debido a que la correcta gestión de los pedidos (residuos en el caso analizado) produce una serie de beneficios que influyen directamente sobre la cadena directa. En el modelo diseñado, la correcta gestión de los residuos permite reducir notablemente el impacto medioambiental, y supone además un ahorro económico en cuanto a materiales, productos y componentes, que deriva en que se reduzcan las tasas de producción, reduciendo así los costes de la cadena directa. Se deduce pues que una buena gestión de la cadena inversa repercute sobre los procesos de la cadena directa. En este modelo se ha podido comprobar cómo la recuperación de las materias primas, los componentes y los productos remanufacturados hacen posible reducir la producción de la cadena directa notablemente, llegando a ser cero en el caso de adquisición de materias primas, ya que los materiales recuperados con la gestión de la cadena inversa son suficientes para cubrir con las necesidades de producción y la demanda.
- Se ha comprobado que el modelo continúa fabricando tanto componentes como productos, a pesar de tener inventarios significativos de estos elementos. Esto se debe a que los modelos de móvil van evolucionando, y siempre se deberán de fabricar nuevas piezas que mejoren a las anteriores, por lo que al largo plazo existirá una acumulación de componentes y productos obsoletos. Al desconocerse los plazos de obsolescencia, no se ha estipulado un tiempo para reconvertir estos elementos obsoletos en materias primas.
- Se conoce que la combinación del Escenario 2, en un entorno positivista y aplicando los porcentajes de la simulación 2 (Escenario 2,1,2), sería la que produciría un mayor beneficio para la cadena. Esto se debe a que este escenario presenta los valores de ingresos más altos junto con los costes más bajos, debido a que se habría optimizado la gestión de la cadena (reduciendo los costes) y nos hallaríamos en una situación donde el valor de mercado de los productos y materiales ha aumentado. A esta situación se le añade el factor de las políticas medioambientales, de manera que su rápida aplicación facilita la gestión de un mayor número de residuos y reducen al máximo la contaminación medioambiental. Finalmente, una mayor tasa de recuperación de componentes implica unos mayores beneficios, debido a que son los elementos con un mayor valor que se recuperan mediante la cadena inversa. En esta simulación, los beneficios superarían los 50 millones de euros semanales.
- Mientras, el Escenario 3, en un entorno negativista y aplicando los porcentajes de la simulación 1 (Escenario 3,3,1) retornaría los peores valores posibles. Esto se debe a que los costes han aumentado y el valor de los productos ha caído considerablemente, se le añade el hecho de que las políticas medioambientales han tardado 30 años en adoptarse completamente, reduciendo la cantidad de residuos recuperados y aumentando el daño medioambiental. Se ha comprobado cómo, mientras un alto porcentaje de recuperación de componentes supone grandes ingresos, un alto porcentaje de remanufactura de producto supone unos ingresos bastante escasos. En esta simulación, los beneficios rondarían entre los 10 y 15 millones de euros semanales.



- Se han realizado diversas simulaciones, variando así los valores obtenidos por las variables aleatorias sobre las cuales se conocía un rango de valores. El resultado ha sido que el modelo seguía presentando las mismas tendencias, y que las variaciones resultaban mínimas, por lo que no ha merecido la pena indagar más en esas variables de rango.
- En el caso de las variables con incertidumbre total, se ha visto como la aplicación de diversos valores discretos y posibles producían resultados muy distintos, como se ha comprobado con las simulaciones del Supuesto 3. Esto indica que estas variables desconocidas podrían influir considerablemente sobre la gestión de la cadena dependiendo de los valores que adoptaran en un caso concreto. Según estos valores, el nivel de beneficios de la cadena y la cantidad de productos recuperados sufriría variaciones significativas, que provocarían que hubiera que actuar en consecuencia para adaptarse a las necesidades de gestión de la cadena en su conjunto. El desconocimiento de estas variables en un momento inicial hace que su análisis mediante la simulación facilite a la hora de la toma de decisiones, dado que se obtiene un rango de resultados posibles sobre los que trabajar.

Por todo lo comentado, se considera que el modelo cumple con las funciones para las cuáles se ha diseñado.



## 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

A lo largo de este trabajo se ha mencionado en numerosas ocasiones términos como el reciclaje, la reutilización de materiales, la gestión de la logística inversa, el impacto medioambiental de los RAEE y la triple sostenibilidad.

Se considera que se ha conseguido relacionar todos estos términos de manera idónea y que se han alcanzado los objetivos planteados al inicio del proyecto. Se ha conseguido crear un modelo capaz de gestionar los residuos generados en España del sector de los teléfonos móviles, y para ello se han debido de cumplir una serie de objetivos más específicos:

- Se ha realizado un estado del arte donde se ha comprobado la utilidad de los modelos de simulación en la gestión de cadenas de suministro inversas con incertidumbre, y cómo los modelos matemáticos pueden facilitar la focalización del problema para cumplir con los objetivos planteados.
- Se ha realizado un estudio sobre la normativa que afecta a los RAEE y su evolución, tanto en España como en el mundo. Se ha comprobado cómo el volumen de residuos que se genera a nivel mundial va en aumento año tras año, provocando un grave impacto medioambiental, sobre todo en los países en desarrollo, donde se envían los residuos del primer mundo. En estos países las instalaciones, políticas, estructuras y tecnologías para tratar estos residuos son ineficientes, por lo que gran parte de los residuos no se tratan debidamente.
- También se ha visto que España es uno de los países con un mayor consumo de telefonía móvil, donde más del 80% de la población dispone de al menos un móvil y el 13% dispone de 2. Estos productos tienen en España uno de los ciclos de vida más cortos del mundo, lo cual genera que el volumen de residuos sea mayor que en otros países y que se vendan más de 20 millones de unidades anualmente.
- Los diagramas diseñados para crear el modelo han demostrado tener estabilidad, tanto a corto como a largo plazo, por lo que el modelo generado a partir de estos ha mostrado claras líneas de tendencia y carece de tendencias al infinito.
- El modelo ha mostrado cómo una rápida y correcta implantación de las políticas medioambientales descritas aumenta el volumen de residuos recuperados mejorando el beneficio de la cadena, y disminuye el volumen de residuos eliminados sin control, lo cual resulta considerablemente beneficioso para el medioambiente. También se ha comprobado que la variación en los porcentajes de remanufactura y de componentes aptos para reutilización directa, tiene un gran efecto sobre los ingresos y que, por tanto, son los componentes los materiales que aportan un mayor volumen de ingresos a la cadena. De manera que, cuanto mayor sean las tasas de recuperación de éstos (acompañadas de bajas tasas de remanufactura de producto) mayores serán los beneficios. Con todo esto, y en el caso de darse unas condiciones económicas propicias (bajos costes y elevados ingresos por los materiales y los procesos), se ha obtenido el Escenario 2,1,2 como el mejor de los analizados, con unos beneficios superiores a los 50 millones de euros semanales.



- Las mejoras aplicadas al modelo general han demostrado ser de utilidad en el caso de aplicarse este modelo a un caso más concreto, como podría ser al sistema de recogida y reciclado de una marca de telefonía móvil en particular. De esta manera también se ha hecho patente la necesidad de reinvertir en la cadena hasta garantizar que se obtienen todos los beneficios posibles.
- Se ha podido comprobar que el modelo se basa en la triple sostenibilidad, dado que se tienen en cuenta tanto los aspectos económico (maximización de beneficios), como medioambientales (reducción de la contaminación producida por residuos desechados incorrectamente y reutilización del máximo de materiales), como sociales (el aumento progresivo con el paso del tiempo del volumen de trabajo hacen necesario reinvertir parte de los beneficios en mejorar la capacidad de procesos e inventarios, mejorando así las instalaciones y tecnologías y aumentando el número de puestos de trabajo).
- Todos estos datos obtenidos se consideran válidos y aplicables a un caso específico debido a que el modelo ha sido correctamente validado y no se conocen variables con comportamiento anómalo.

A lo largo del desarrollo de este proyecto se han adquirido una serie de habilidades, que junto con las competencias adquiridas durante el Máster han servido para la resolución del trabajo planteado:

- Se ha aprendido a realizar búsquedas bibliográficas acordes a lo que se desea encontrar, conociendo así diversas bases de datos e ideando maneras de mejorar los filtros aplicados para acotar las búsquedas. Del mismo modo, se ha producido una familiarización con la metodología para desarrollar correctamente un estado del arte, debido a que se han realizado diversos estados del arte a lo largo del curso académico, y no únicamente el presente en este trabajo.
- Se ha tomado consciencia sobre la importancia de la triple sostenibilidad, a partir tanto de la lectura de los artículos como de trabajos desarrollados durante el curso, y es por ello por lo que se ha considerado importante aplicarla al trabajo. Por tanto, la resolución del problema ha estado dirigida por el objetivo de aplicar la triple sostenibilidad al modelo.
- Se ha comprobado la importancia de la gestión de los RAEE en el mundo y las consecuencias de no eliminar estos residuos de manera correcta. También se ha visto cómo vivimos en uno de los países que más móviles tiene en función a los habitantes, y que la escasa esperanza de vida que aplicamos a estos productos genera una gran cantidad de desechos, de los cuales únicamente el 35% se recuperan.
- De la misma manera, se han realizado otros trabajos a lo largo del curso académico basados en la logística verde, la cadena de suministro inversa, la gestión de pedidos bajo incertidumbre y la realización de un modelo de simulación. Todos estos trabajos han servido como base de conocimiento para desarrollar este proyecto, ya que tratan temas ligados al caso desarrollado.
- Se ha aprendido a desarrollar un modelo de simulación sobre una cadena de suministro de circuito cerrado, en base a estudiar diversos modelos, realizar un análisis exhaustivo de los valores que adoptan las variables del sector, y aplicar la lógica de cómo debería de funcionar el modelo. Para ello, primero se replicaron un par de modelos dedicados a



los RAEE y pudo comprobarse que los valores obtenidos no correspondían a los de los artículos al 100% en ninguno de los casos. Esto llevó a que se estudiaran las variables y sus relaciones de manera individual, hasta comprender el funcionamiento de cada una de ellas dentro del modelo. Posteriormente, se realizaron modificaciones a los modelos y se fue construyendo sobre ellos hasta que finalmente se obtuvo un modelo propio compuesto por las variables que se consideraban necesarias para resolver el problema planteado. Los valores de algunas de estas variables se fueron modificando durante el desarrollo del trabajo, dado que en determinados momentos se observaron errores que no se habían visualizado con anterioridad y que requerían de una modificación tanto del modelo como del análisis de sus resultados.

- Finalmente, se aplicaron los conocimientos adquiridos durante el curso para validar el modelo, y a ellos se sumaron las habilidades de modelado desarrolladas durante la ejecución del trabajo para idear una serie de mejoras aplicables al modelo.

Todos estos conocimientos se han aplicado a lo largo del trabajo, con el fin de demostrar que se ha realizado un estudio en profundidad sobre el tema abordado en este proyecto (la gestión de pedidos en una cadena de suministro inversa con incertidumbre, aplicada al sector de la telefonía móvil en España) y que las aportaciones finales del mismo han sido desarrolladas de manera propia.

El modelo que se ha diseñado sigue abierto a mejoras y modificaciones para obtener una mejor representación de la realidad. Algunas de estas posibles mejoras se han ido comentando a lo largo del trabajo, y no se han realizado debido a que excedían la extensión del proyecto o a que no se disponía de las herramientas para llevarlas a cabo, como pueden ser:

- Aplicación de los modelos matemáticos para optimizar secciones de la cadena no sujetas a incertidumbre: se ha planteado la posibilidad de utilizar los modelos matemáticos estudiados para obtener resultados óptimos en bucles de la cadena donde no se halle la incertidumbre, con la intención de incorporar posteriormente esos resultados al modelo de simulación.
- Estudio del modelo aplicando valores específicos de una cadena de suministro concreta: resultaría interesante, si se dispusieran de datos asociados a una cadena específica, aplicarlos al modelo, con el fin de conocer si hay variaciones significativas con el modelo diseñado o si por el contrario resulta ser una buena representación de la realidad. En este supuesto se podrían incluir los gastos e ingresos provenientes de la cadena directa, para la cual se carecía de datos en este proyecto.
- Aplicar restricciones de capacidad a todas las variables de nivel y diseñar un plan de mejora e inversión: todas las variables de nivel y flujo son susceptibles de tener restricciones de capacidad, debido a que el almacenamiento y la capacidad de procesar producto no es ilimitado en el mundo real. En este trabajo se ha recurrido a una simplificación del modelo debido a la falta de datos sobre la capacidad de flota, de volumen de trabajo y de almacenamiento, pero son variables que se deberían de utilizar para crear un modelo menos generalista. En esta línea de trabajo, también sería interesante idear un plan de inversión y mejora para ir aumentando estas capacidades conforme se alcanza el 100% de funcionamiento de la cadena.





## BIBLIOGRAFÍA

- 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>
- Alamerew, Y. A., & Brissaud, D. (2020). Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120025>
- Asif, F. M. A., Rashid, A., Bianchi, C., & Nicolescu, C. M. (2015). System dynamics models for decision making in product multiple lifecycles. *Resources, Conservation and Recycling*, 101, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.05.002>
- Ayvaz, B., Bolat, B., & Aydin, N. (2015). Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.006>
- 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>
- Baldé; C. P.; Forti; Gray; Kuehr; P.; R.; Stegmann; V. (2017). *Observatorio mundial de los residuos electrónicos 2017 Cantidades, Flujos, y Recursos*. Retrieved from [https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM 2017/GEM 2017-S.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM%202017/GEM%202017-S.pdf)
- Banguera, L., Sepúlveda, J. M., Fuertes, G., Carrasco, R., & Vargas, M. (2017). Reverse and inverse logistic models for solid waste management. *South African Journal of Industrial Engineering*, 28(4), 120–132. <https://doi.org/10.7166/28-4-1701>
- Besiou, M., Georgiadis, P., & Van Wassenhove, L. N. (2012). Official recycling and scavengers: Symbiotic or conflicting? *European Journal of Operational Research*, 218(2), 563–576. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.030>
- Bing, X., Bloemhof, J. M., Ramos, T. R. P., Barbosa-Povoa, A. P., Wong, C. Y., & van der Vorst, J. G. A. J. (2016). Research challenges in municipal solid waste logistics management. *Waste Management*, 48, 584–592. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.025>
- Blumberga, A., Timma, L., Romagnoli, F., & Blumberga, D. (2015). Dynamic modelling of a collection scheme of waste portable batteries for ecological and economic sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 88(2015), 224–233. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.063>
- Bollinger, L. A., Davis, C., Nikolić, I., & Dijkema, G. P. J. (2012). Modeling Metal Flow Systems: Agents vs. Equations. *Journal of Industrial Ecology*, 16(2), 176–190. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00413.x>
- Casper, R., & Sundin, E. (2018). Reverse Logistic Transportation and Packaging Concepts in Automotive Remanufacturing. *Procedia Manufacturing*, 25, 154–160. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.069>
- Chaharsooghi, S. K., Heydari, J., & Zegordi, S. H. (2008). A reinforcement learning model for





- supply chain ordering management: An application to the beer game. *Decision Support Systems*, 45(4), 949–959. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2008.03.007>
- Chan, C. K., Man, N., Fang, F., & Campbell, J. F. (2019). Supply chain coordination with reverse logistics: A vendor/recycler-buyer synchronized cycles model. *Omega*, 102090. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.07.006>
- Chen, D., Ignatius, J., Sun, D., Zhan, S., Zhou, C., Marra, M., & Demirbag, M. (2019). Reverse logistics pricing strategy for a green supply chain: A view of customers' environmental awareness. *International Journal of Production Economics*, 217, 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.031>
- Componentes Móvil - Tienda online de repuestos de telefonía. (2020). Retrieved July 1, 2020, from <https://www.componentesmovil.es/>
- Das, D., & Dutta, P. (2013). A system dynamics framework for integrated reverse supply chain with three way recovery and product exchange policy. *Computers and Industrial Engineering*, 66(4), 720–733. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.016>
- de Oliveira, C. T., Mônica, M. M. M., & Campos, L. M. S. (2019). Understanding the Brazilian expanded polystyrene supply chain and its reverse logistics towards circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 235, 562–573. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.319>
- Dev, N. K., Shankar, R., & Swami, S. (2019). Diffusion of green products in industry 4.0: Reverse logistics issues during design of inventory and production planning system. *International Journal of Production Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107519>
- Di Nola, M. F., Escapa, M., & Ansah, J. P. (2018). Modelling solid waste management solutions: The case of Campania, Italy. *Waste Management*, 78, 717–729. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.006>
- Dondo, R. G., & Méndez, C. A. (2016). Operational planning of forward and reverse logistic activities on multi-echelon supply-chain networks. *Computers and Chemical Engineering*, 88, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2016.02.017>
- Dutta, P., Mishra, A., Khandelwal, S., & Katthawala, I. (2020). 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>
- Garcia, C. A., & Hora, G. (2017, December 1). State-of-the-art of waste wood supply chain in Germany and selected European countries. *Waste Management*, Vol. 70, pp. 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.025>
- Georgiadis, P., & Vlachos, D. (2004). Decision making in reverse logistics using system dynamics. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 14(2), 259–272. <https://doi.org/10.2298/YJOR0402259G>
- Georgiadis, Patroklos. (2013). An integrated system dynamics model for strategic capacity planning in closed-loop recycling networks: A dynamic analysis for the paper industry. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 32, 116–137. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2012.11.009>



- Georgiadis, Patroklos, & Athanasiou, E. (2010). The impact of two-product joint lifecycles on capacity planning of remanufacturing networks. *European Journal of Operational Research*, 202(2), 420–433. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.022>
- Georgiadis, Patroklos, & Athanasiou, E. (2013). Flexible long-term capacity planning in closed-loop supply chains with remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, 225(1), 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.09.021>
- Georgiadis, Patroklos, & Besiou, M. (2008). Sustainability in electrical and electronic equipment closed-loop supply chains: A System Dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1665–1678. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.019>
- Georgiadis, Patroklos, & Besiou, M. (2010). Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: A system dynamics analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5–8), 475–493. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2362-7>
- Georgiadis, Patroklos, & Vlachos, D. (2004). The effect of environmental parameters on product recovery. *European Journal of Operational Research*, 157(2), 449–464. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00203-0](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00203-0)
- 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>
- Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E., Musmanno, R., & Vigo, D. (2014). Operations research in solid waste management: A survey of strategic and tactical issues. *Computers and Operations Research*, 44, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.10.006>
- Ghisolfi, V., Diniz Chaves, G. de L., Ribeiro Siman, R., & Xavier, L. H. (2017). System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A perspective for social inclusion of waste pickers. *Waste Management*, 60, 14–31. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.018>
- Godichaud, M., & Amodeo, L. (2015). Efficient multi-objective optimization of supply chain with returned products. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 683–691. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.12.004>
- Golroudbary, S. R., & Zahraee, S. M. (2015). System dynamics model for optimizing the recycling and collection of waste material in a closed-loop supply chain. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 53, 88–102. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.02.001>
- Govindan, K., & Bouzon, M. (2018). From a literature review to a multi-perspective framework for reverse logistics barriers and drivers. *Journal of Cleaner Production*, 187, 318–337. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.040>
- 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. (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>

- 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, W., Wei, L., Zhang, W., & Yan, X. (2019). Evolutionary game analysis of cooperation between natural resource- and energy-intensive companies in reverse logistics operations. *International Journal of Production Economics*, 218, 159–169. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.05.001>
- Guarnieri, P., Cerqueira-Streit, J. A., & Batista, L. C. (2020). Reverse logistics and the sectoral agreement of packaging industry in Brazil towards a transition to circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104541>
- Islam, M. T., & Huda, N. (2018). Reverse logistics and closed-loop supply chain of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)/E-waste: A comprehensive literature review. *Resources, Conservation and Recycling*, 137(March), 48–75. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.026>
- ITU. (2020). Statistics. Retrieved from <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/stat/default.aspx>
- Kantar Worldpanel, & Guenveur, L. (2017). *An Incredible Decade for the smartphone*. 9.
- Kim, J., Chung, B. Do, Kang, Y., & Jeong, B. (2018). Robust optimization model for closed-loop supply chain planning under reverse logistics flow and demand uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1314–1328. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.157>
- Lu, S., Zhu, L., Wang, Y., Xie, L., & Su, H. (2020). Integrated forward and reverse logistics network design for a hybrid assembly-recycling system under uncertain return and waste flows: A fuzzy multi-objective programming. *Journal of Cleaner Production*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118591>
- Mesjasz-Lech, A. (2019). Reverse logistics of municipal solid waste - Towards zero waste cities. *Transportation Research Procedia*, 39, 320–332. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.034>
- MINISTERIO DE AGRICULTURA ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. (2015). Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. *Boletín Oficial Del Estado*, (8508), 1.
- Orange. (2020). ¿Qué pasa cuando reciclas un móvil\_\_ Somos Responsables - Orange. Retrieved from <http://somosresponsables.orange.es/que-pasa-cuando-reciclas-un-movil/>
- Pascual, J. A. (2019). Dónde va a parar la basura tecnológica que tiramos. Retrieved from Computer Hoy website: <https://computerhoy.com/reportajes/tecnologia/donde-va-a-parar-basura-tecnologica-551585>
- Prajapati, H., Kant, R., & Shankar, R. (2019a). 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>



- Prajapati, H., Kant, R., & Shankar, R. (2019b). Prioritizing the solutions of reverse logistics implementation to mitigate its barriers: A hybrid modified SWARA and WASPAS approach. *Journal of Cleaner Production*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118219>
- Rahimi, M., & Ghezavati, V. (2018). Sustainable multi-period reverse logistics network design and planning under uncertainty utilizing conditional value at risk (CVaR) for recycling construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1567–1581. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.240>
- Rivero, F. (2018). Ditrendia - Informe Mobile 2018: Mobile en España y en el Mundo 2018. *Ditrendia*, 1–106. Retrieved from <https://mktefa.ditrendia.es/hubfs/Ditrendia-Informe-Mobile-2018.pdf>
- Roghalian, E., & Pazhoheshfar, P. (2014). An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment by using genetic algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(3), 348–356. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.02.007>
- Rosa, P., & Terzi, S. (2018). Improving end of life vehicle's management practices: An economic assessment through system dynamics. *Journal of Cleaner Production*, 184, 520–536. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.264>
- Sanchis Gisbert, R., & Poler Escoto, R. (2018). *Las Fases del Proceso de Gestión de Pedidos según las Estrategias de Cumplimiento de Pedidos*. Retrieved from <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/104399>
- Sanni, S., Jovanoski, Z., & Sidhu, H. S. (2020). An economic order quantity model with reverse logistics program. *Operations Research Perspectives*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2019.100133>
- Seroka-Stolka, O., & Ociepa-Kubicka, A. (2019). Green logistics and circular economy. *Transportation Research Procedia*, 39, 471–479. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.049>
- Sinha, R., Laurenti, R., Singh, J., Malmström, M. E., & Frostell, B. (2016). Identifying ways of closing the metal flow loop in the global mobile phone product system: A system dynamics modeling approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.010>
- Soleimani, H., & Govindan, K. (2014). Reverse logistics network design and planning utilizing conditional value at risk. *European Journal of Operational Research*, 237(2), 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.030>
- Šomplák, R., Pavlas, M., Nevrlý, V., Touš, M., & Popela, P. (2019). Contribution to Global Warming Potential by waste producers: Identification by reverse logistic modelling. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1294–1303. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.165>
- Sudarto, S., Takahashi, K., & Morikawa, K. (2017). Reprint “Efficient flexible long-term capacity planning for optimal sustainability dimensions performance of reverse logistics social responsibility: A system dynamics approach.” *International Journal of Production Economics*, 190, 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.06.017>
- Trochu, J., Chaabane, A., & Ouhimmou, M. (2019). A two-stage stochastic optimization model



for reverse logistics network design under dynamic suppliers' locations. *Waste Management*, 95, 569–583. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.012>

Van Engeland, J., Beliën, J., De Boeck, L., & De Jaeger, S. (2020). Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains. *Omega (United Kingdom)*, 91, 102012. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2018.12.001>

Vlachos, D., Georgiadis, P., & Iakovou, E. (2007). A system dynamics model for dynamic capacity planning of remanufacturing in closed-loop supply chains. *Computers and Operations Research*, 34(2), 367–394. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.005>

Zarbakshnia, N., Soleimani, H., Goh, M., & Razavi, S. S. (2019). A novel multi-objective model for green forward and reverse logistics network design. *Journal of Cleaner Production*, 208, 1304–1316. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.138>



## ANEXOS

Tabla 18: Variables de stock del modelo en VenSim.

Variable Stock	Descripción	Ecuación	Dimensiones	Nº
<b>Recursos naturales</b>	Disponibilidad de recursos naturales	-Tasa de adquisición +1.000.000.000.000	g de material	1
<b>Materias primas</b>	Acumula las materias primas que se utilizarán para la producción de componentes	Tasa de adquisición + Tasa de reciclaje - (Tasa de producción de componentes/Componentes por producto) + 0	g de material	2
<b>Stock de componentes</b>	Acumula los componentes que se utilizarán en la producción	INTEGER (Tasa de producción de componentes + Tasa de componentes aceptados para utilización directa + Tasa de componentes remanufacturados - Tasa de producción de producto - Componentes inservibles) + 0	Uds de componentes	3
<b>Stock de producto</b>	Acumula productos terminados	INTEGER (Tasa de producción de producto + Tasa de remanufactura de productos - Pedidos) + 0	Uds de producto	4
<b>Stock de distribución</b>	Acumula productos en distribución	INTEGER (Pedidos - Ventas) + 0	Uds de producto	5
<b>Productos en uso</b>	Productos en uso en el mercado de consumo	INTEGER (Ventas - Tasa de descarte - Tasa de retención) + 45.309.695	Uds de producto	6
<b>Productos en hibernación</b>	Productos que permanecen en casa de los usuarios sin ser desechados por algún motivo	INTEGER (Tasa de retención-Tasa de desechado) + 3000000	Uds de producto	7
<b>Demanda acumulada</b>	Demanda insatisfecha que se atenderá cuando el stock de distribución esté disponible	Demanda - Tasa de reducción de demanda acumulada + 0	Uds de producto	8
<b>Pedidos acumulados</b>	Órdenes insatisfechas que serán atendidas cuando el stock de producción esté disponible	Pedidos de distribuidores-Tasa de reducción de pedidos acumulados +0	Uds de producto	9
<b>Producción de producto acumulada</b>	Producción insatisfecha que se servirá cuando el stock de componentes esté disponible	Pedidos de producción de producto - Tasa de reducción de producción de producto acumulada + 0	Uds de producto	10
<b>Producción de componentes acumulada</b>	Producción insatisfecha que se servirá cuando el stock de materias primas esté disponible	Pedidos de producción de componentes-Tasa de reducción de producción componentes acumulada +0	Uds de componentes	11
<b>Productos recolectados</b>	Cantidad de producto recogido para reprocesarlo y devolverlo a la cadena	INTEGER (Tasa de recolección total -Ratio de aceptación de producto para remanufactura - Tasa de rechazo de producto para remanufactura) + 0	Uds de producto	12





<b>Eliminación incontrolable</b>	Cantidad de producto que se sale de la cadena y se elimina de manera incontrolada	Tasa de eliminación incontrolable + 0	Uds de producto	13
<b>Productos aceptados para remanufactura</b>	Productos que se consideran aptos para remanufactura ya que el coste de reparación no supera los beneficios esperados	INTEGER (Ratio de aceptación de producto para remanufactura - Tasa de remanufactura de productos) + 0	Uds de producto	14
<b>Productos rechazados para remanufactura</b>	Productos que no se consideran aptos para remanufactura ya que el coste de reparación supera los beneficios esperados	INTEGER (Tasa de rechazo de producto para remanufactura - Componentes de productos rechazados/Componentes por producto) + 0	Uds de producto	15
<b>Inventario de componentes de productos rechazados</b>	Componentes extraídos de los productos rechazados para remanufactura, de manera que se puedan aprovechar para crear nuevos productos	INTEGER (Componentes de productos rechazados - Tasa de componentes aceptados para utilización directa - Tasa de componentes rechazados para utilización directa) + 0	Uds de componentes	16
<b>Componentes rechazados para utilización directa</b>	Componentes que requieren de una reparación para su uso o que deben de eliminarse o reconvertirse en materias primas	INTEGER (Tasa de componentes rechazados para utilización directa + Tasa de reposición de componentes - Tasa de componentes remanufacturados - Tasa de recuperación de materiales reciclables - Tasa de eliminación) + 0	Uds de componentes	17
<b>Eliminación controlada</b>	Componentes que no pueden repararse ni reciclarse para obtener las materias primas, por lo que deben de eliminarse de manera controlada	Tasa de eliminación controlable + 0	g de material	18
<b>Materiales reciclables</b>	Acumula el material susceptible de reciclaje	Tasa de recuperación de materiales reciclables/Componentes por producto*Q-Desviación-Tasa de reciclaje + 0	g de material	19

Tabla 19: Variables de flujo del modelo en VenSim.

Variable Flujo	Descripción	Ecuación	Dimensiones	Nº
<b>Tasa de adquisición</b>	Recursos necesarios para la producción	MAX (MIN (RECURSOS NATURALES/Q/Tiempo de adquisición, (Pedidos esperados por producción de componentes-Tasa de reciclaje esperada - STOCK DE MATERIAS PRIMAS) /Tiempo de adquisición),0)	g material/ semana	20



<b>Tasa de producción de componentes</b>	Componentes producidos por unidad de tiempo	MAX (MIN (STOCK DE MATERIAS PRIMAS * Componentes por producto / 12.2, PRODUCCIÓN COMPONENTES ACUMULADA - Componentes reutilizables esperados - STOCK DE COMPONENTES) / Tiempo de producción de componentes, 0)	Uds de componentes/ semana	21
<b>Tasa de producción de producto</b>	Unidades producidas por unidad de tiempo	MAX (MIN (STOCK DE COMPONENTES / Componentes por producto, PRODUCCIÓN PRODUCTO ACUMULADA - Producto remanufacturado esperado - STOCK DE PRODUCTO) / Tiempo de producción de producto, 0)	Uds de producto/ semana	22
<b>Pedidos</b>	Tasa que elimina los productos en stock de acuerdo con la demanda	MIN (STOCK DE PRODUCTO, PEDIDOS ACUMULADOS) / Tiempo de pedido	Uds de producto / semana	23
<b>Ventas</b>	Cantidad unitaria vendida por unidad de tiempo	MIN (STOCK DE DISTRIBUIDORES, DEMANDA ACUMULADA) / Tiempo de entrega	Uds de producto / semana	24
<b>Tasa de descarte</b>	Unidades descartadas por unidad de tiempo	INTEGER (RANDOM UNIFORM (0.35, 0.59, 1) * PRODUCTOS EN USO) / Tiempo de residencia	Uds de producto / semana	25
<b>Tasa de retención</b>	Unidades retenidas por los usuarios	INTEGER (RANDOM UNIFORM (0.41, 0.65, 1) * PRODUCTOS EN USO) / Retraso de retención	Uds de producto / semana	26
<b>Tasa de desechado</b>	Unidades que habían sido retenidas, pero son desechadas	INTEGER (PRODUCTOS EN HIBERNACIÓN) / Tiempo de retención	Uds de producto / semana	27
<b>Demanda</b>	La cantidad de móviles que los consumidores desean comprar durante un período de tiempo a través de la regresión de ventas pasadas	RANDOM UNIFORM (433292, 609589, 1)	Uds de producto / semana	28
<b>Tasa de reducción de demanda acumulada</b>	La tasa de reducción de la demanda insatisfecha que espera móviles	Ventas	Uds de producto / semana	29
<b>Pedidos de distribuidores</b>	Las solicitudes realizadas desde el escalón de distribución al escalón de producción	Demanda esperada	Uds de producto / semana	30
<b>Tasa de reducción de pedidos acumulados</b>	La tasa de reducción de órdenes de distribución insatisfechas que aguarda móviles	Pedidos	Uds de producto / semana	31
<b>Pedidos de producción de producto</b>	Las solicitudes realizadas desde el escalón de producción de producto al escalón de proveedores	Pedidos esperados por distribución	Uds de producto / semana	32
<b>Tasa de reducción de producción de producto acumulada</b>	La tasa de reducción de pedidos de producción de producto insatisfechos que aguarda móviles	Tasa de producción de producto + Tasa de remanufactura de productos	Uds de producto / semana	33





<b>Pedidos de producción de componentes</b>	Las solicitudes realizadas desde el escalón de producción de componentes al escalón de producción de producto	(Pedidos esperados por producción de producto - Producto remanufacturado esperado) * Componentes por producto	Uds de componentes / semana	34
<b>Tasa de reducción de producción de componentes acumulada</b>	La tasa de reducción de pedidos de producción de componentes insatisfechos	Tasa de producción de componentes + Tasa de componentes aceptados para utilización directa + Tasa de componentes remanufacturados	Uds de componentes / semana	35
<b>Tasa de eliminación incontrolable</b>	Residuos eliminados incorrectamente	INTEGER ((1- Porcentaje de recogida) * Productos utilizados) / Tiempo de eliminación incontrolable	Uds de producto / semana	36
<b>Tasa de recolección total</b>	Cantidad de residuos eliminados correctamente que entran a formar parte de la cadena inversa	INTEGER (Productos utilizados * Porcentaje de recogida) / Tiempo de recolección	Uds de producto / semana	37
<b>Tasa de aceptación de producto para remanufactura</b>	Productos que son aptos para remanufactura dado que se estima que los costes de reparación no superarán los ingresos de revender el producto reparado	INTEGER (Porcentaje de producto remanufacturable * PRODUCTOS RECOLECTADOS / Tiempo de inspección inicial)	Uds de producto / semana	38
<b>Tasa de rechazo de producto para remanufactura</b>	Productos que no son aptos para remanufactura dado que se estima que los costes de reparación superarán los ingresos de revender el producto reparado	INTEGER ((1 - Porcentaje de producto remanufacturable) * PRODUCTOS RECOLECTADOS / Tiempo de inspección inicial)	Uds de producto / semana	39
<b>Tasa de remanufactura de productos</b>	Productos que son reparados y se reincorporan al stock de producto	INTEGER (PRODUCTOS ACEPTADOS PARA REMANUFACTURA / Tiempo de reprocesado)	Uds de producto / semana	40
<b>Tasa de reposición de componentes</b>	Componentes dañados de los productos remanufacturados	INTEGER (PRODUCTOS ACEPTADOS PARA REMANUFACTURA * Componentes inservibles / Tiempo de desmontaje)	Uds de componentes / semana	41
<b>Componentes de productos rechazados</b>	Componentes que se extraen de los productos no aptos para remanufactura con el fin de aprovecharlos	INTEGER (Componentes por producto * PRODUCTOS RECHAZADOS PARA REMANUFACTURA / Tiempo de desmontaje)	Uds de componentes / semana	42
<b>Tasa de componentes aceptados para utilización directa</b>	Componentes extraídos de los productos rechazados para remanufactura que son aptos para su reutilización y pasan a formar parte del stock de producto	INTEGER (INVENTARIO DE COMPONENTES DE PRODUCTOS RECHAZADOS * Porcentaje de componentes para reutilización directa / Tiempo de inspección de componentes)	Uds de componentes / semana	43
<b>Tasa de componentes rechazados para utilización directa</b>	Componentes extraídos de los productos rechazados para remanufactura que no son aptos para su reutilización y deben de ser tratados	INTEGER (INVENTARIO DE COMPONENTES DE PRODUCTOS RECHAZADOS * (1 - Porcentaje de componentes para reutilización directa) / Tiempo de inspección de componentes)	Uds de componentes / semana	44



<b>Tasa de eliminación controlable</b>	Componentes que no pueden repararse ni convertirse en materias primas y se eliminan de manera correcta	COMPONENTES RECHAZADOS PARA UTILIZACIÓN DIRECTA * Porcentaje de eliminación / Tiempo de eliminación controlada	g material/ semana	45
<b>Tasa de componentes remanufacturados</b>	Componentes que son reparados y devueltos al stock de componentes	INTEGER (COMPONENTES RECHAZADOS PARA UTILIZACIÓN DIRECTA * (1- Porcentaje de eliminación) * Porcentaje de remanufactura / Tiempo de reprocesamiento secundario)	Uds de componentes / semana	46
<b>Tasa de recuperación de materiales reciclables</b>	Componentes que no pueden repararse y se reconvierten en materias primas	COMPONENTES RECHAZADOS PARA UTILIZACIÓN DIRECTA * (1- Porcentaje de eliminación) * (1- Porcentaje de remanufactura de componentes) / Tiempo de reprocesamiento secundario	g material/ semana	47
<b>Tasa de reciclaje</b>	Cantidad de material reciclado por unidad de tiempo	(MATERIALES RECICLABLES * Porcentaje de retorno) / Tiempo de reciclaje	g material/ semana	48
<b>Desviación</b>	Porcentaje de material que no vuelve a la misma cadena de suministro	((1- Porcentaje de retorno) * MATERIALES RECICLABLES) / Retraso de desviación	g material/ semana	49

Tabla 20: Variables auxiliares del modelo en VenSim.

Variable Auxiliar	Descripción	Ecuación	Dimensiones	Nº
<b>Tiempo de adquisición</b>	Tiempo requerido para la adquisición de materia prima	3	semanas	50
<b>Tiempo de producción de componentes</b>	Tiempo requerido para fabricar los componentes	1.2	semanas	51
<b>Tiempo de producción de producto</b>	Tiempo requerido para fabricar el producto	2	semanas	52
<b>Tiempo de pedido</b>	Tiempo requerido para la adquisición de materia prima	1.5	semanas	53
<b>Tiempo de entrega</b>	Período entre la solicitud y el pedido de reposición de stock	1	semanas	54
<b>Tiempo de residencia</b>	Tiempo de uso de los productos por parte de los consumidores antes de ser desechados	86.7	semanas	55
<b>Retraso de retención</b>	Tiempo de uso de los productos por parte de los consumidores antes de ser sustituidos por otros y pasar a estado de hibernación, siendo aún propiedad del usuario	86.7	semanas	56



<b>Tiempo de retención</b>	Período de tiempo en el que el producto permanecerá con el consumidor final, incluso después del final de su uso o el final de su ciclo de vida	260	semanas	57
<b>Demanda esperada</b>	Pronóstico de demanda utilizando suavizado exponencial	SMOOTH N (Demanda, 12, Demanda, 1)	Uds de producto / semana	58
<b>Pedidos esperados por distribución</b>	Pronóstico de órdenes de distribución utilizando suavizado exponencial	SMOOTH N (Pedidos distribuidores, 12, Pedidos distribuidores, 1)	Uds de producto / semana	59
<b>Pedidos esperados por producción de producto</b>	Pronóstico de pedidos de producción de producto utilizando suavizado exponencial	SMOOTH N (Pedidos productores de producto, 12, Pedidos productores de producto, 1)	Uds de producto / semana	60
<b>Pedidos esperados por producción de componentes</b>	Pronóstico de pedidos de producción de componentes utilizando suavizado exponencial	SMOOTH N (Pedidos productores de componentes, 12, Pedidos productores de componentes, 1)	Uds de componentes / semana	61
<b>Tasa de reciclaje esperada</b>	Pronóstico de la tasa de reciclaje utilizando suavizado exponencial	SMOOTH N (Tasa de reciclaje, 48, Tasa de reciclaje, 1)	g / semana	62
<b>Tiempo de reciclaje</b>	Tiempo requerido para reciclar el material que regresa para la misma cadena de suministro	4	semanas	63
<b>Porcentaje de retorno</b>	Porcentaje de materiales que regresan a la misma cadena de suministro.	0.95	%	64
<b>Retraso de desviación</b>	Tiempo requerido para enviar materiales o componentes que lleguen a otra cadena de suministro	4	semanas	65
<b>Productos utilizados</b>	Productos que han sido desechados y pueden o no ser recolectados	Tasa de descarte + Tasa de desechado	Uds de producto / semana	66
<b>Políticas medioambientales</b>	Conjunto de normativas ideadas para el tratamiento de los RAEE.	Escenario positivista: RAMP (0.001308, -244.706, 520) Escenario realista: RAMP (0.0006539, -489.412, 1040) Escenario pesimista: RAMP (0.0004359, -734.118, 1560)	%	67
<b>Porcentaje de recogida</b>	Porcentaje de recolección realizado por empresas y recicladores	$0.4 * \tanh(4 * \text{Políticas medioambientales} - 2) + 0.6$	%	68



<b>Tiempo de recolección</b>	Tiempo requerido para realizar actividades relacionadas con la recolección, clasificación, empaque y almacenamiento	2	semanas	69
<b>Tiempo de eliminación incontrolable</b>	Tiempo requerido para realizar actividades relacionadas con la eliminación no controlada	1	semanas	70
<b>Porcentaje de producto remanufacturable</b>	Porcentaje de productos que el coste de remanufacturarlos no es superior al valor final del producto	Simulación 1: 0.65 Simulación 2: 0.35 Simulación 3: 0.5	%	71
<b>Tiempo de inspección inicial</b>	Tiempo requerido para realizar una inspección que permita conocer si el producto debe remanufacturarse o desmontarse para aprovechar las piezas	1	semanas	72
<b>Componentes por producto</b>	Número de componentes intercambiables por producto	20	Uds de componentes	73
<b>Tiempo de reprocesado</b>	Tiempo necesario para reparar los productos y devolverlos al mercado	1.2	semanas	74
<b>Tiempo de desmontaje</b>	Tiempo requerido para llevar a cabo actividades relacionadas con el desmontaje de los móviles	1	semanas	75
<b>Componentes inservibles</b>	Componentes dañados que se extraen de los productos que se remanufacturan para poder tratarlos	INTEGER (RANDOM UNIFORM (0, 20, 1))	Uds de componentes / semana	76
<b>Producto remanufacturado esperado</b>	Producto apto para la venta que se espera que se remanufacture	SMOOTH N (Tasa de remanufactura productos, 12, Tasa de remanufactura de productos, 1)	Uds de producto / semana	77
<b>Tiempo de eliminación controlable</b>	Tiempo requerido para realizar actividades relacionadas con la eliminación controlada	1	semanas	78
<b>Porcentaje de eliminación</b>	Porcentaje de producto que no puede ni repararse ni reciclarse y se debe de eliminar de manera controlada	0.01	%	79



<b>Porcentaje de remanufactura de componentes</b>	Porcentaje de componentes que son reparables para que vuelvan a formar parte del proceso de fabricación	Simulación 1: 0.35 Simulación 2: 0.65 Simulación 3: 0.5	%	80
<b>Tiempo de reprocesamiento secundario</b>	Tiempo necesario para reparar los componentes o recuperar los materiales reciclables	2	semanas	81
<b>Porcentaje de componentes para reutilización directa</b>	Porcentaje de componentes que pueden devolverse al stock de componentes sin necesitar un tratamiento previo	Simulación 1: 0.35 Simulación 2: 0.65 Simulación 3: 0.5	%	82
<b>Tiempo de inspección de componentes</b>	Tiempo necesario para inspeccionar los componentes y determinar si son reparables, reciclables o deben de ser eliminados	1	semanas	83
<b>Componentes reutilizables esperados</b>	Componentes que se esperan, tanto los que eran aptos como los remanufacturados	SMOOTH N (Tasa de componentes aceptados para utilización directa + Tasa de componentes remanufacturados, 12, Tasa de componentes aceptados para utilización directa + Tasa de componentes remanufacturados, 1)	Uds de componentes / semana	84
<b>Q</b>	Cantidad (promedio) de cada material (cobre, oro, plata y paladio) en móviles	11.845 (cobre); 0.305 (plata); 0.0325 (oro); 0.0155 (paladio)	g	85