

Capítulo 1

Introducción

1.1 Presentación

El sector de los proveedores del automóvil, es un sector complejo que abarca diversidad de tecnologías, procesos, productos y materias primas, en un mercado altamente competitivo, que exige una continua reducción de costes. Sin embargo, siempre se ha podido asumir que es un sector que goza de una demanda de los productos altamente uniforme. Esta característica de la demanda ha propiciado el desarrollo del fenómeno de coproducción. La coproducción consiste en la búsqueda intuitiva de un aprovechamiento máximo de la utilización de la máquina, fabricando dos productos de modo simultáneo, intentando aumentar el servicio y disminuir los costes. Se dice intuitiva, pues tal y como se desarrolla a lo largo de la tesis, para conseguir abaratar realmente los costes mediante la coproducción es necesario definir correctamente el proceso. La coproducción es un tema poco trabajado en la literatura, y que en la realidad industrial todavía no se ha resuelto de un modo claro.

Esta tesis se enmarca dentro de la línea de investigación del Grupo de Investigación en Reingeniería, Organización, trabajo en Grupo y Logística empresarial - ROGLE, del Departamento de Organización de Empresas de la Universidad Politécnica de Valencia, al cual pertenece la doctoranda. Este grupo de investigación trabaja en áreas ligadas a la gestión industrial tales como: Mejora Continua, Gestión y Control de Producción e Inventarios, Diseño y Reingeniería de Sistemas de Producción y Logística o Trabajo en Equipo y Gestión de Recursos Humanos. La actividad desarrollada por este grupo se encuadra en el trinomio: Educación, Investigación y Aplicación en Empresas, siendo los principales sectores en los que opera el sector de la automoción, en el que se enmarca esta tesis, el sector cerámico y el sector de distribución comercial.

1.2 Objetivo de la tesis

El objetivo de esta tesis doctoral es realizar un análisis y modelado del problema de programación de producción con coproducción controlada y deliberada (*DCC – Deliberate Controlled Coproduction*), en el contexto del sector de los proveedores del automóvil, que se asimila al problema *ELSP - Economic Lot Scheduling Problem* (Problema de Programación del Lote Económico), y que se denominará *DCC-ELSP (Deliberate Controlled Coproduction Economic Lot Scheduling Problem)*. Así como, la definición de diferentes metodologías y algoritmos para resolver el problema *DCC-ELSP* de manera satisfactoria. De modo introductorio, señalar que existe coproducción cuando un proceso productivo da como resultado más de un producto de manera simultánea. Si se conoce toda la información sobre los parámetros de producción (tiempos, costes, ratios de fabricación...) se dice que la coproducción es controlada. Si se puede decidir fabricar con coproducción o independientemente cada producto se dice que la coproducción es deliberada.

Para contextualizar el problema de la coproducción, se repasan brevemente las principales características de la programación de producción en el contexto del sector de los proveedores del automóvil, que afectan directamente al objetivo de esta tesis. En este entorno se presentan los diversos ejemplos del problema *DCC-ELSP*, que motivaron esta tesis, cómo el que aparece en la industria de producción de piezas del automóvil. Los automóviles contienen muchas partes simétricas para el lado izquierdo y derecha del vehículo (retrovisores, puertas, faros, etc). Estos procesos de producción son a menudo diseñados para producir la parte izquierda y la parte derecha al mismo tiempo. Esta situación no parece ser un problema cuando se producen piezas para un coche nuevo. Sin embargo, las mismas instalaciones de fabricación se utilizan para producir piezas de repuesto para reemplazar las piezas dañadas.

A continuación, se realizará un estado del arte para conocer el punto de vista desde el que se ha estudiado el problema de la coproducción, y las experiencias existentes en cuanto a modelado. También resulta interesante revisar las variaciones que se han propuesto respecto al problema clásico *ELSP*, para enmarcar el problema *DCC-ELSP*.

Una vez hecho esto, se propone una resolución analítica. Para esto se presenta un modelo y algoritmo para el *DCC-ELSP* con dos coproductos. El algoritmo diseñado permite definir los parámetros que permiten minimizar los costes de coproducir dos productos, con demanda no sustituible. El análisis detallado del modelo, muestra la dificultad de planteamiento y de resolución para el problema en el caso de existir más de dos coproductos. Por tanto, para la resolución del problema en un ambiente multi-ítem mixto, en el que existen productos que pueden coproducirse mientras que otros se fabrican de manera aislada, se considera adecuado plantear métodos de resolución que se basen en procedimientos heurísticos.

La dificultad de conocer a priori la idoneidad de los diferentes métodos heurísticos y de las variantes planteadas, hace obligatorio un análisis experimental de los mismos. De este modo, se diseña un experimento que será simulado mediante la plataforma *Anylogic*. Los resultados de la simulación son comparados y analizados obteniendo interesantes conclusiones sobre las heurísticas y los parámetros de diseño. Así, es posible obtener que heurísticas y que parámetros son los más adecuados para modelar adecuadamente el fenómeno de coproducción deliberada y controlada, con un menor coste total.

Por último, se dejan abiertas diversas líneas de trabajo futuro, que han sido descubiertas en el transcurso del presente trabajo y merecen una profundización en las mismas.

En definitiva en la presente tesis se pretende:

- Analizar la realidad industrial para encuadrar el problema de coproducción deliberada y controlada
- Describir el proceso de coproducción deliberada y controlada - *DCC*
- Analizar la literatura existente respecto al problema *DCC-ELSP*
- Definir un modelo analítico para la coproducción deliberada y controlada de dos productos, *DCC-ELSP-2P*
- Definir y evaluar métodos heurísticas para la aplicación del modelo de *DCC-ELSP-2P*, en un entorno multi-ítem mixto
- Plantear nuevas líneas de trabajo e investigación

1.3 Esquema general de la tesis

Tras este primer capítulo introductorio, la tesis se estructura en cuatro partes claramente diferenciadas, de acuerdo con la Figura 1.1. En la primera parte, en el capítulo 2, se revisan aquellos aspectos de la programación de producción en el sector del automóvil directamente relacionados con el objetivo de esta tesis. Este objetivo es analizar y modelar el proceso de coproducción deliberada y controlada en el *ELSP (DCC-ELSP)*. Así, se pretende presentar y enmarcar el proceso desde el punto de vista de la realidad industrial. En el capítulo 3, se realiza el estado del arte que permite conocer cual es el estado del tema de coproducción en la bibliografía publicada. Se aprecia como la variante de coproducción deliberada prácticamente no ha sido ni siquiera mencionada en la literatura revisada. Con esto el problema queda también enmarcado en las fuentes de bibliografía.

En la segunda parte se plantean los modelos y métodos de resolución del problema del *DCC-ELSP*. Por la dificultad del problema, en el capítulo 4 se plantea un modelo para el caso de la coproducción deliberada y controlada de dos coproductos, con resultado del algoritmo *DCC-ELSP-2P*. En el capítulo 5 este modelo se exporta y se integra en los métodos de resolución heurísticos, para el caso de un sistema multi-ítem mixto con productos que se coproducen y otros que no se coproducen. Estos métodos consisten en 9 procedimientos heurísticos, definidos y adaptados para el problema del *DCC-ELSP*. Se trata de una selección de entre más de 20 procedimientos diseñados.

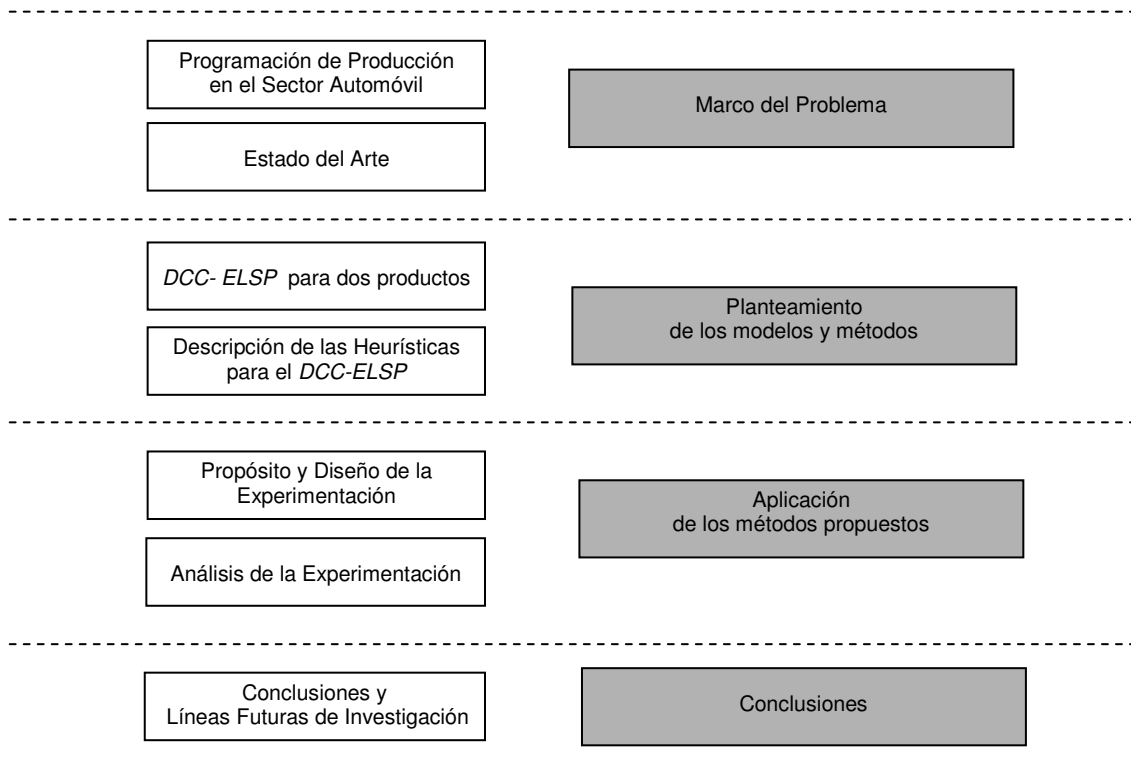


Figura 1.1 Esquema general de la tesis

En la tercera parte, se aplican los modelos propuestos. En el capítulo 6, se plantea el propósito y los parámetros de diseño de la experimentación. Se considera adecuado evaluar el comportamiento del caso de estudio frente a diferentes utilidades del sistema. En el capítulo 7, se realiza el análisis de los resultados obtenidos con las herramientas planteadas. Así, se extraen conclusiones respecto a que heurísticas y parámetros son los óptimos de acuerdo con la utilización del sistema.

Por último, en la cuarta parte que se compone del capítulo 8, se plantean las conclusiones de la tesis así como, las posibles líneas de futuro. Se cierra la tesis con un conjunto de anexos.

Capítulo 2

Programación de Producción en el Sector del Automóvil

2.1 Introducción

En este capítulo, teniendo en cuenta la diversidad de tecnologías, productos y materias primas existentes en el sector de los proveedores del automóvil, se realiza una revisión de las características más relevantes en materia de programación y planificación de la producción, que afectan directamente al problema planteado en esta tesis, esto es, la coproducción deliberada y controlada. Del mismo modo, al presentar estas características es posible ratificar que es adecuado asemejar este entorno al problema del *ELSP - Economic Lot Scheduling Problem*. Para todo ello, en primer lugar se realiza una breve introducción a la taxonomía de proveedores que aparece en el sector. A continuación, se analizan detalladamente las características involucradas directamente en el proceso de coproducción. De este modo se analizan características relativas a los procesos, la demanda, las necesidades de inventarios, la capacidad productiva y la falta de fiabilidad en la información disponible (Garcia-Sabater et al., 2006a; Garcia-Sabater y Marin-Garcia, 2009; Garcia-Sabater et al., 1999; Garcia-Sabater, 2000; Garcia-Sabater y Vidal-Carreras, 2010; Garcia-Sabater et al., 2006b; Miralles et al., 2005; Vidal-Carreras y Garcia-Sabater, 2005). Una vez hecho esto, parece oportuno presentar el problema de la coproducción desde el punto de vista de la realidad industrial mostrando ejemplos ilustrativos.

2.2 Los proveedores en el sector del automóvil

Las actividades del sector candidatas a ser ejecutadas por los proveedores son principalmente aquellas no vinculadas directamente a la carrocería, como por ejemplo la fabricación de los asientos, retrovisores, cinturones, techos, y puertas entre otras. Siguiendo las tendencias del mercado, los proveedores observan como la complejidad y variedad de los productos demandados se incrementa considerablemente.

De esta forma, cobra importancia el grado de dependencia de la empresa ensambladora con el proveedor, incluyendo en ocasiones relaciones en el nivel de diseño. En este escenario, surge una clasificación de proveedores en distintos niveles (*tiers*) anunciada en (Laming, 1993) de acuerdo con su relación con la empresa ensambladora y la actividad a la que se dedican (Chase et al., 2004) como se observa en la Figura 2.1.

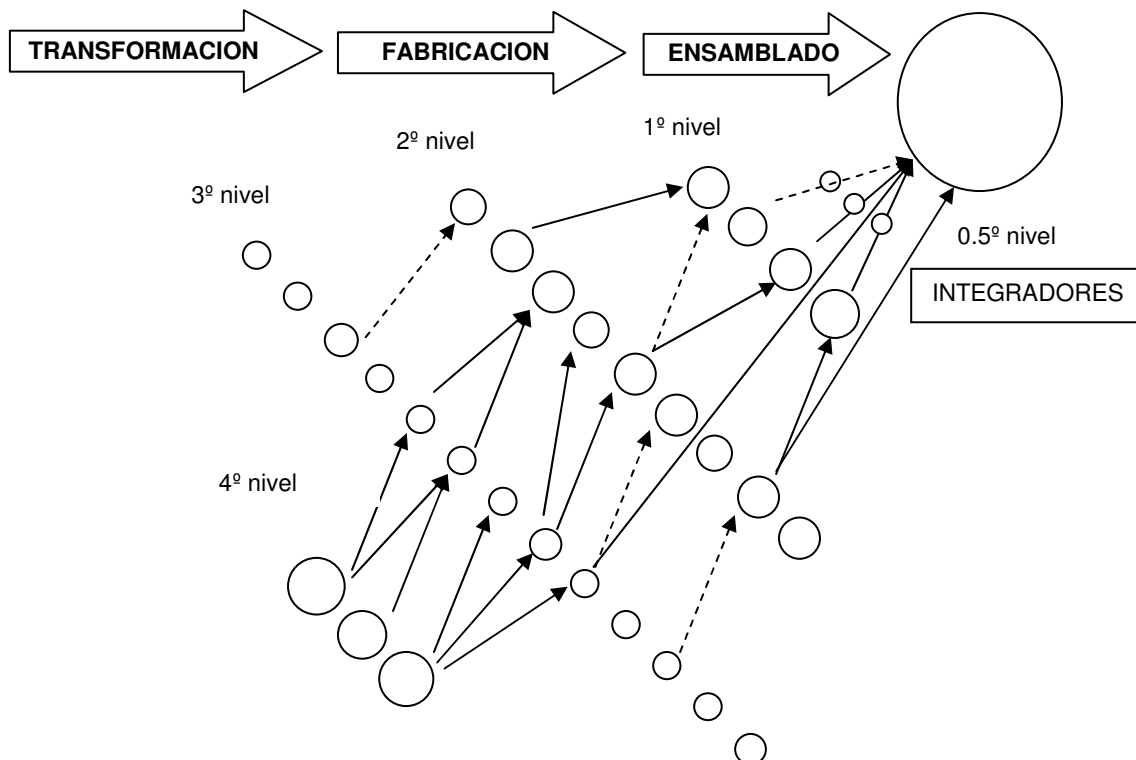


Figura 2.1 Niveles de Proveedores. Elaboración propia con base en (Sachon y Albiñana, 2004)

De acuerdo con la Figura 2.1, es posible definir los proveedores del primer nivel (*tier 1*), como aquellos que se ocupan de la fabricación de módulos que se ensamblan directamente en la carrocería. Los proveedores de segundo nivel (*tier 2*), son aquellos que suministran componentes (como ABS, sistemas de encendido, puertas, etc.) a los proveedores de primer nivel. Los del tercer nivel (*tier 3*)

proveen piezas a los del segundo nivel. Finalmente, los del cuarto nivel (*tier 4*) y niveles posteriores se ocupan de proveer la materia prima y componentes básicos a los siguientes. Al tradicional esquema se ha agregado un proveedor de Nivel 0.5 (*tier 0.5*) para acomodar las emergentes empresas integradoras de sistemas (Bouvard et al., 2002). Señalar que, a pesar de esta clasificación, las líneas de división entre los distintos niveles pueden ser permeables. Por ejemplo, según (Hahn et al., 2000) la cadena de suministro de Hyundai (el primer fabricante de automóviles en Corea), tiene aproximadamente 400 proveedores directos; 2,500 de segundo nivel; y un desconocido número de proveedores de tercer nivel, o superior. Además, es posible que un mismo proveedor abarque varios niveles.

Para poder entender la complejidad de las relaciones entre los distintos niveles, es necesario distinguir también el tipo de servicio de los proveedores a la empresa ensambladora. Aparecen proveedores convencionales, *JIT*, secuenciados o sincronizados. Un proveedor *JIT* (*Just In Time*, Justo a tiempo) es aquel que suministra los productos con una alta calidad en el momento justo, en la cantidad demandada. Un proveedor convencional, gestiona su inventario de acuerdo con un sistema *Push* (o de empuje). En un sistema *Push* las órdenes de aprovisionamiento y producción, se generan, a partir de pedidos en firme y previsiones. Además el tamaño de lote de un proveedor convencional es considerablemente mayor que un proveedor *JIT* (*Just in time*). Un proveedor *JIT* gestiona su inventario con un sistema *Pull* (o de arrastre). En un sistema *Pull* el consumo de material necesario para un proceso desencadena la reposición por el proceso precedente, con lo que únicamente se reemplaza el material consumido por el proceso posterior. Los proveedores secuenciados sirven exactamente el conjunto de productos solicitados por la secuencia de montaje. Los proveedores sincronizados fabrican al mismo ritmo que la propia línea de montaje de los ensambladores

Una vez situados en un nivel de proveedores, para poder determinar qué tipo de proveedor sería el más adecuado, es posible analizar los parámetros de la famosa fórmula del tamaño de lote óptimo *EOQ-EMQ* de (Harris, 1913; Harris, 1990). Cuanto mayor es el tamaño de un producto, mayor es su coste de almacenamiento, por lo que su tamaño de lote decrece. Si aumenta la complejidad del producto, aumenta la posibilidad de obsolescencia de cada una de las piezas que lo integra, por lo que el tamaño de lote también tiende a decrecer. Si aumenta la variedad del producto, decrece la demanda y con ella el tamaño de lote. Si además los cambios de partida son muy frecuentes por la reducción del tamaño de lote, el propio cambio de partida tendrá una disminución en su coste debida al efecto aprendizaje, disminuyendo de nuevo el denominado lote óptimo.

Con todo esto, parece claro que la tendencia es que los proveedores más próximos en nivel a la empresa ensambladora, se sitúen lo más cerca posible de ésta, de forma que puedan servir exactamente lo requerido en cada momento. Así, los proveedores deben convertirse en pequeñas ramificaciones de la línea de montaje.

Además, la complejidad entre las relaciones entre clientes y proveedores, exige que estos últimos dispongan de una estrategia de producción de máximo rendimiento. A continuación, se pretende establecer, las características que definen y los principios básicos que gobiernan, el proceso de programación de la producción en los proveedores directamente relacionadas con el problema de la tesis, esto es, coproducción deliberada y controlada.

2.3 Descripción del sistema productivo en los proveedores

Como era de esperar, por las propias características del producto fabricado, se trata de un sector poco homogéneo, ya que conviven multitud de tecnologías y productos, desde el tratamiento químico de piezas metálicas hasta el conformado mecánico de piezas plásticas o elementos textiles. Sin embargo, es posible establecer unas características que son generalmente aplicables a todas ellas. A continuación, las características más relevantes se clasifican como relativas a los procesos, al transporte entre plantas, a la demanda, a los inventarios y a la capacidad productiva.

2.3.1 Procesos

Se distinguen principalmente procesos de tratamiento químico, de mecanizado y de montaje:

- Los procesos de tratamiento químico cómo puede ser el pintado, tienen cómo característica relevante la existencia de un coste de preparación elevado. Este coste tiene dos componentes, el coste del propio material (por ejemplo el disolvente) y el coste de oportunidad del sistema, ligado a la pérdida de capacidad del mismo por el cambio de producto, tratamiento o color. Otra característica destacable de este proceso es su variabilidad, que genera grandes cantidades de desperdicios o *scrap*.
- Los procesos de mecanizado tradicionalmente se han realizado tomando como materia prima metales y sus derivados. Sin embargo, la incursión del plástico en los últimos años ha ido en aumento. Este hecho, aunque ha modificado el proceso concreto de mecanizado, ha mantenido constantes sus características básicas, ligadas al alto coste de tiempo de cambio de partida y el incremento sustancial de volumen que tiene algunas piezas, tras sufrir un proceso de mecanizado.
- Los procesos de montaje aprovechan la demanda continua de productos, para generar líneas de montaje más productivas que los sistemas monopuesto. Aparecen configuraciones variables de acuerdo con la flexibilidad requerida; sistemas monopuesto, líneas dedicadas a la fabricación de un único producto,

líneas multi-modelo, o incluso proveedores que emulan la línea de montaje del fabricante principal, siendo por tanto líneas con mezcla de modelos. Dentro de estos procesos encontramos subgrupos especiales, como los procesos de soldadura que tienden a estar completamente automatizados.

2.3.2 Demanda

La estabilidad de la demanda y su extenso horizonte ha sido tradicionalmente una característica de identidad para este sector. Sin embargo, en la actualidad debido a la situación del mercado, esta característica va perdiendo fortaleza. Al tratarse de un entorno cambiante, en el que no es sencillo realizar previsiones, las actuales demandas a las que se enfrentan los proveedores son mucho menos predecibles así como de un volumen más reducido. Lógicamente una de las medidas adoptadas por los fabricantes de coches es la reducción de los inventarios existentes.

Sin embargo, la estabilidad para el sector por el propio sistema productivo es una necesidad fundamental. Para conseguir esta estabilidad, es necesario distanciarse de la demanda, es decir, de algún modo se requiere establecer una distancia temporal entre la demanda real del cliente y la fabricación. Los modos de conseguir esta distancia se traducen en la acumulación de inventarios de productos acabados por parte de los concesionarios, y/o plazos de entrega del automóvil elevados, de acuerdo con la Figura 2.2.

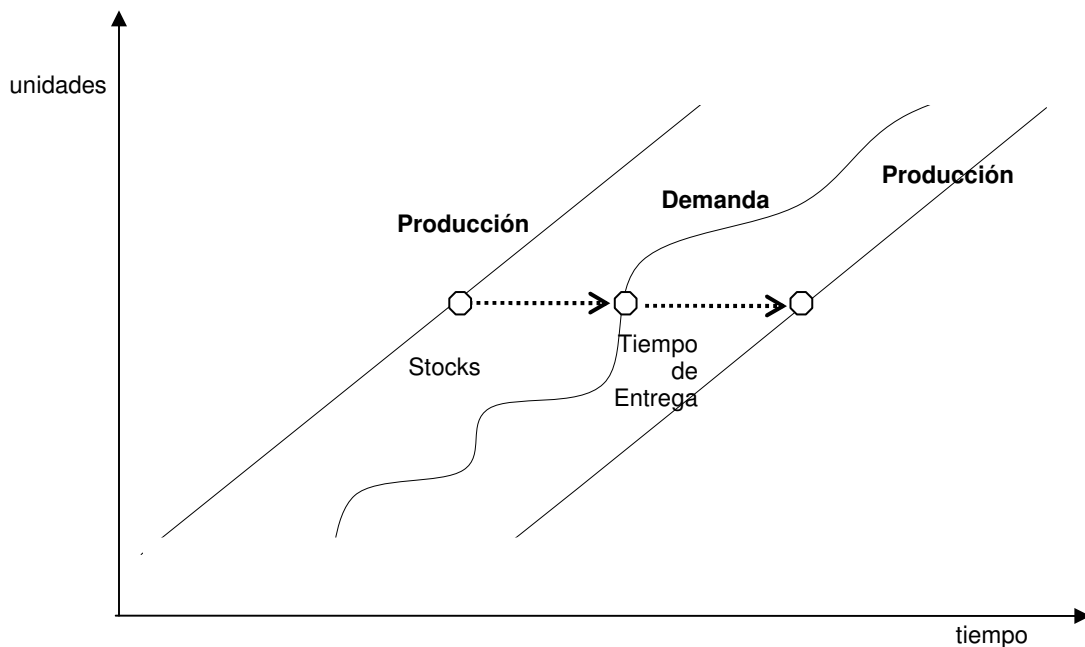


Figura 2.2 Ajuste de demanda

Cómo la producción siempre se adelanta un periodo considerable a la demanda futura (Figura 2.2) basándose en pronósticos de demanda, la situación de los concesionarios debida a la crisis económica actual, muestra como la producción no se detuvo cuando lo hizo el consumo. De este modo los concesionarios han acumulado gran cantidad de vehículos en inventario. Una reducción de la demanda implica una reducción de la capacidad, que puede conseguir parcialmente a través de ERE's (expedientes de regulación de empleo) o paros de la instalación.

En cualquier caso la estabilidad, como elemento básico del funcionamiento del *JIT*, deberá ser recuperado o el modelo de trabajo (basado en inventario reducido y capacidad ajustada) no será operativo. Un diseño sobrecapacitado y/o con exceso de inventario, va contra los principios operativos del *JIT*, pero sin estos no es posible hacer frente a la inestabilidad de la demanda. Aunque puede que el amplio horizonte en la previsión de la demanda se mantenga, su fiabilidad cada día será más dudosa. Normalmente se dispone de una demanda para varios meses de los productos e incluso de los componentes a adquirir. Esta demanda se dispone de manera discreta (diariamente o semanalmente) con tanta estabilidad como es posible, puesto que se trata de una característica necesaria para los sistemas *JIT*. Sin embargo, esta demanda no es exacta día a día, apareciendo incluso oscilaciones relevantes cuyas desviaciones que suelen igualarse en el periodo completo. Las características actuales del mercado también han afectado a uno de los puntos débiles de los pronósticos de demanda en este sector, como es, la fiabilidad. Tradicionalmente la falta de fiabilidad en esta demanda de orígenes estables se debe a la frecuencia, tanto de los cambios como de las entregas. Al entregar en algunos casos varias veces al día el producto, el planificador observa una irregularidad mayor.

La demanda suele ser calculada por los clientes a través de su sistema *MRP - Material Requirements Planning*, sin tener en consideración las limitaciones de capacidad de cada uno de sus proveedores. Cómo se detalla en el siguiente apartado, es posible que esto genere roturas de inventario que afecta lógicamente a las demandas percibidas por el resto de proveedores de la cadena. Al ser un mercado en continua innovación y con continuos cambios de ingeniería y de diseño, la demanda de ciertos productos tiene un ratio de obsolescencia mayor que en otros sectores.

2.3.3 Inventarios

Los programas corporativos y en ocasiones transcorporativos de reducción continúa de inventarios, son un principio básico en este sector. Más aún, la falta de liquidez del mercado potencia esta estrategia, aunque como se ha comentado, esa reducción es incompatible con la inestabilidad y falta de predicción en la demanda.

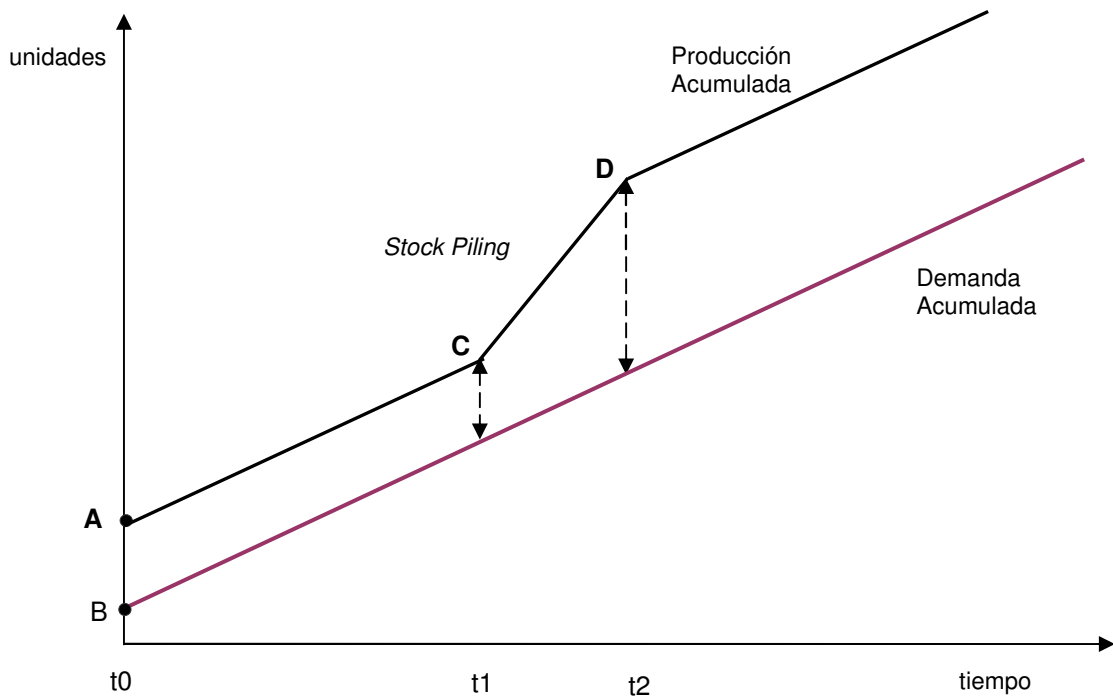
Los inventarios son la protección de los proveedores frente a diferentes irregularidades. Éstas pueden ser propias, aunque en ocasiones están ligadas al cliente que, aunque exige reducciones de inventarios, no es capaz de corregir los problemas que los hacen necesarios.

Se deben distinguir dos tipos de inventario: de producto acabado, y de materia prima y materia en curso. El inventario de producto acabado, como se ha comentado anteriormente, es el encargado de proporcionar estabilidad a la demanda interna, pues permite alejarse de la demanda externa. La creciente reducción de los ciclos de vida de los productos hace que este modo de trabajo sea cada vez más caro. Los inventarios de materias primas protegen de la inestabilidad del suministro, y en ocasiones son la principal fuente de beneficios (comprando barato y vendiendo a precio estable) de muchos proveedores. Por último, la materia en curso es la que realmente es controlada en un sistema Kanban y su minimización depende de la estabilidad del sistema.

Para los proveedores suele ser muy complejo conocer el inventario en tiempo real puesto que, tanto las entregas como las recepciones de material y los controles de calidad, son muy frecuentes. La implicación más relevante de este fenómeno radica en que, en muchos casos, en estos periodos de incertidumbre se producen o consumen unos inventarios que no pueden considerarse despreciables. Los costes de obsolescencia de los inventarios también son elevados, puesto que el mercado demanda nuevos modelos, que suponen componentes y productos diferentes.

Resulta interesante comentar la influencia de los *racks* dedicados en la producción ya que los niveles inventarios están directamente relacionados. Un *rack* es un contenedor con distintos tamaños estandarizados empleado para el transporte de componentes. Se denomina dedicado porque se emplea para un producto concreto y su tamaño condiciona el número de unidades a almacenar. Los *racks* dedicados suponen un modo de control de la producción o los inventarios. Si un proceso no dispone de *racks* para almacenar su producto resultante, una vez sea fabricado, es difícil que se lance su producción. O en caso de que se haya lanzado, los costes de manipulación aumentarán. En las distintas etapas de un proceso, se crea un flujo de *racks* liberados que debe considerarse. Al mismo tiempo que los productos estarán disponibles para ser servidos una vez esté completa la primera unidad o *rack*.

Parece oportuno comentar en este apartado una característica del inventario denominada *stock piling* o apilado de inventario por su relación con la demanda, así como también con la capacidad productiva. La Figura 2.3 presenta gráficamente el concepto de *stock piling*.

Figura 2.3 Concepto de *Stock Piling*

Se trata de un efecto directo de la descentralización de la producción: los calendarios laborales diferentes. El apilado de inventario es el proceso por el cual se adelanta la producción de un ítem, para cubrir la demanda de aquellos periodos en los que no está previsto producir. Al tratarse de sistemas con una capacidad productiva muy ajustada, como se comentará en detalle en el apartado correspondiente, el único modo de poder superar esta situación consiste en aprovechar el escaso exceso de capacidad productiva que pueda existir, con una considerable antelación. Este *stock piling* distorsiona gravemente la percepción de la demanda, al alejar la producción del consumo que realmente se está produciendo.

De acuerdo con la Figura 2.3 un posible exceso de capacidad productiva se muestra con el segmento A-B. Sin embargo, cuando se prevé que en un futuro no se va a poder producir por falta de capacidad productiva, se realiza un apilado de inventario, que consiste en fabricar muy por encima de las necesidades reales de demanda durante un periodo concreto. En la Figura 2.3 se observa un periodo de apilado de inventario desde el punto C hasta el punto D. Los motivos de una menor capacidad productiva puede ser muy dispares como ejemplo: periodos vacacionales, mantenimientos exhaustivos de maquinarias y picos estacionales de demanda.

2.3.4 Capacidad Productiva

La capacidad productiva está muy ajustada a los requerimientos solicitados, aprovechando tanto el relativo conocimiento de la demanda futura como la imperiosa necesidad de reducir costes. La limitación de capacidad generalmente esta asociada a las maquinarias utilizadas, pero puede ocurrir que la limitación esté en el personal disponible. Cada tipo de limitación exige un comportamiento diferente, pues el nivel de flexibilidad y el coste de la misma dependen del factor limitante.

Anteriormente se ha indicado como, la combinación de esta limitación de capacidad y los calendarios laborales entre proveedores y clientes, exigen una planificación de los periodos no activos en el largo plazo. En el corto plazo afecta la variabilidad en el número de trabajadores, tanto por posibles bajas como la asistencia a cursos de perfeccionamiento, a menudo externos, exigidos por planes de mejora continúa y programas de aseguramiento de la calidad (*TQM*). Aparece como posible recurso las horas extra, que a diferencia de otras áreas, están fuertemente limitadas, siendo las cuentas de horas un elemento clave para superar esta limitación (Martínez Costa y Olivella Nadal, 2010). La cuenta de horas o bolsa de horas se entiende como el mecanismo o cuenta que regula y refleja las horas trabajadas en menos (debe en la cuenta del trabajador) y las horas trabajadas en más (haber en la cuenta del trabajador) sobre la base de jornada individual convenida (en el convenio, acuerdo o contrato). Por lo tanto, las horas de funcionamiento semanales reales no están fijadas a las horas semanales contratadas (Wolf, 2004). La cuenta está sujeta a unos máximos, de uno y otro signo, y a veces se fuerza a que la compensación de las horas trabajadas de más o de menos se realice en un máximo de tiempo.

Las pruebas, prototipos o *try-outs* ligados al continuo proceso de oferta y de cambios de ingeniería consumen cantidades de capacidad cada vez más elevadas, aumentando la saturación de los sistemas. Los datos relacionados con la capacidad productiva varían constantemente, puesto que la relativa estabilidad de la demanda, permite unos efectos de aprendizaje tanto en el proceso de cambio de partida o *setup*, como en el propio proceso productivo.

Para concluir este apartado, señalar que para dotar al sistema de flexibilidad y robustez es común que existan varios modos de producir un mismo producto. Por otro lado, la elevada repetición de las diferentes operaciones, lleva a muchos proveedores a diseñar procesos ultra-optimizados. Una de las variantes más frecuentes es la coproducción deliberada, es decir poder combinar productos para ser producidos simultáneamente, y así aprovechar mejor la capacidad productiva (Vidal-Carreras, 2009).

2.3.5 Falta de fiabilidad de la información disponible respecto a los inventarios

La programación de producción para un proveedor se puede asimilar con un sistema de fabricación contra inventario, donde la previsión de la demanda viene entregada por el cliente en un modo inexacto. Dicha previsión es el resultado de aplicar técnicas *MRP* sobre un plan de producción, que no se podrá realizar completamente, y que exigirá el adelanto de producción de días posteriores. Ya se ha comentado la imposibilidad de conocer con exactitud la cantidad de inventario en un momento dado, pues tanto la producción como el consumo de los diferentes productos no son conocidos en tiempo real. Además, no es despreciable la existencia de retrabajos (*reworks*) (Haji, 2006) que recuperan parte de la producción considerada como *scrap*.

Aunque es común la consideración de que en el sector del automóvil no valen los retrasos esta afirmación no es estrictamente así, en realidad lo que ocurre es que al no haber fechas de entrega, no se puede afirmar que haya retraso. Sí se produce con relativa frecuencia un fenómeno denominado *backlog* (pedidos pendientes) (Altiok y Shiue, 1994), por el cual la producción que tenía que haber sido servida ayer todavía no ha sido entregada hoy. El *backlog* aceptable depende generalmente de la relación cliente-proveedor. Un fenómeno ligado a los retrasos son los adelantos. El retraso negativo es un efecto directo de la búsqueda de la reducción de costes en transporte. Se envían piezas antes de que sean pedidas, para aprovechar mejor los contenedores. El adelanto debe ser considerado con especial cuidado, puesto que es inventario propio pero en casa del cliente, y así como los retrasos se podrían agregar, los adelantos no se pueden agregar.

Respecto a la información que hace falta para "optimizar" procesos existen problemas ligados a la naturaleza del proceso y a la naturaleza de las organizaciones. En general se suelen utilizar costes para representar los "*tradeoff*" entre las diferentes opciones. Por un lado, los costes de cambios de partida que pueden asociarse a: materiales perdidos (*scrap* de producto acabado o material de limpieza), horas de personal o de equipamiento. Pero quizá, el coste más importante, ligado a la falta de capacidad, es el coste de oportunidad de la capacidad utilizada en el cambio de partida, difícilmente evaluable como tal (Segerstedt, 1996). Respecto a los costes de almacenamiento estos son supuestamente altos (no se debe olvidar que el *JIT* recibe también el nombre de producción con cero inventario). Sin embargo, es difícil encontrar una empresa que tenga cuantificados estos costes. Más habitual es que la empresa tenga limitado la cantidad de días de inventario que quiere mantener para todos los productos. Una sofisticación mayor del sistema radica en desear minimizar los niveles de inventario cuando se alcanza el momento de una auditoría o un control de inventario. Y en cualquier caso, habría tres niveles de costes de almacenamiento a considerar: el coste que representa para la empresa, el coste que representa para los

trabajadores directamente implicados con la optimización y el coste que el inventario supone para el correcto funcionamiento de un sistema *Lean*.

Además, si se emplean herramientas informáticas de programación se debe considerar en que momento de tiempo se van a actualizar los inventarios, si al principio, al final del día, o continuamente. También se han de considerar los recuentos de materiales que se realizan periódicamente, y que modifican las unidades de productos en inventario.

2.4 Coproducción

La estabilidad de la demanda ya comentada ha propiciado el desarrollo del fenómeno de coproducción. La coproducción consiste en la búsqueda intuitiva de un aprovechamiento máximo de la utilización de la máquina fabricando dos productos de modo simultáneo, intentando aumentar el servicio y disminuir los costes (Deuermeyer, 1978). En ocasiones, los productos obtenidos en un proceso de coproducción se puedan clasificar de acuerdo con algún tipo de jerarquía, que si es de calidad de lugar a los llamados subproductos o *byproducts* (Evans, 1969; Ou, 1995) En el sector del automóvil no se da este tipo de coproducción. El tipo de coproducción que se observa es una coproducción controlada y deliberada para productos cuyas demandas son no sustituibles. Cada producto tiene su propio mercado, por lo que la demanda no puede ser reemplazada. Se habla de coproducción controlada porque se controla/conoce toda la información sobre los parámetros de producción (tiempos, costes, ratios de fabricación...). Se dice que es deliberada porque se puede decidir fabricar con coproducción o independientemente cada producto. La coproducción aparece en los sistemas de productivos en los que hay más que un producto producido en la máquina en un momento dado.

A continuación ilustramos varios ejemplos que aparecen en el sector del automóvil.

Los automóviles contienen muchas partes simétricas para el lado izquierdo y derecha del vehículo (retrovisores, puertas, faros, etc). Estos procesos de producción son a menudo diseñados para producir la parte izquierda y la parte derecha al mismo tiempo. Esta situación no parece ser un problema cuando se producen piezas para un coche nuevo. Sin embargo, las mismas instalaciones de fabricación se utilizan para producir piezas de repuesto para reemplazar las piezas dañadas. Por lo tanto, la demanda de los productos que son coproducidos puede ser diferente.

En el proceso de estampado en la industria del automóvil aparece otro caso. Se trata de una prensa hidráulica que corta piezas metálicas que se integrarán en el chasis del coche. Llamemos a esta piezas producto *a*. La geometría de las piezas

contiene un "espacio vacío" (ej: el hueco de las ventanas) y puede usarse para cortar otra pieza en su interior, llamemos producto b , empleando el mismo golpe de corte (*stroke*). Las opciones para el *stroke* o la opción productiva son las siguientes: cortar a , cortar b , o cortar a y b , esto es, coproducir $a+b$. Aparece claramente la opción de una coproducción ($a+b$) que es deliberada, y controlada puesto que se conocen los costes y tiempos de preparación del proceso, así como los ratios de fabricación de la prensa.

El tercer ejemplo ocurre en el área de soldadura es el siguiente. Se trata de un robot de soldadura integrado dentro de una celda de manufactura como se muestra en la Figura 2.4.

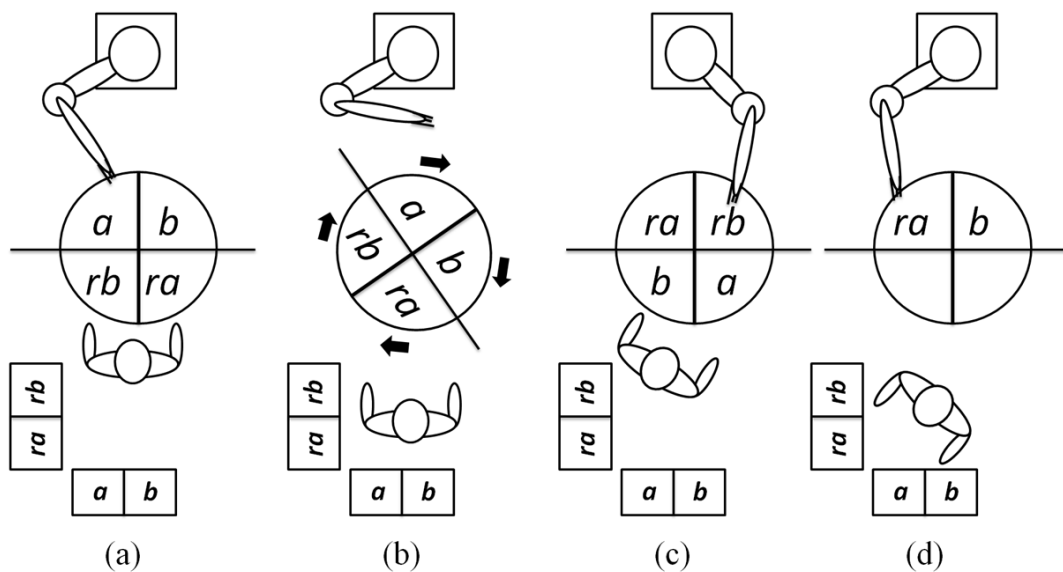


Figura 2.4 Ejemplo de la coproducción en un robot de soldadura

La programación del robot permite que opere sobre dos piezas dentro de una misma orden de ejecución. El robot trabaja sobre dos posiciones en las que se colocan los productos (piezas estampadas) que van a soldarse. Estas piezas pueden ser iguales, por ejemplo a y a , o b y b o distintas, por ejemplo a y b . Así pues aparece claramente la opción de una coproducción ($a+b$) que es deliberada. Esta coproducción también es controlada puesto que se conocen los costes y tiempos de preparación del proceso, así como los ratios de fabricación del robot. Como ejemplo, se va a describir el caso con coproducción $a+b$. El robot opera sobre el material cargado en dos posiciones de la plataforma de trabajo, esto es, sobre la materia prima de a y b (ra y rb , respectivamente), para dar como resultado dos productos diferentes terminados (a y b). Simultáneamente el operario retira los productos terminados de la anterior orden de fabricación (a y b) de las otras dos posiciones de la plataforma, y coloca sobre estas la materia prima

para la siguiente orden de fabricación, ra y rb como se muestra en la Figura 2.4(c). Una vez ha terminado este proceso la plataforma gira 180° comenzando de nuevo el ciclo. Se puede consultar el video en: http://personales.upv.es/pivicar/ejemplo_robot.wmv

2.5 Conclusiones

En este capítulo, se describen con detalle aquellos aspectos relevantes de la Programación de Producción en empresas suministradoras del Sector del automóvil que afectan directamente al problema planteado en esta tesis, esto es la coproducción deliberada y controlada. La demanda en este sector es relativamente fiable y constante aunque se ve afectada por los continuos cambios de ingeniería y la característica de un servicio de *racks* completos. El sistema productivo a modelar se caracteriza por unos considerables tiempos y costes de cambio de partida o *setup*. Estos tiempos de *setup* pueden depender (ej. pintura) o no depender de la secuencia de producción. La capacidad del sistema suele estar muy ajustada, y está afectada por el fenómeno de apilado de inventario debido a los desajustes de calendario. Los costes de almacenamiento del producto deben considerarse y dependen del volumen de las piezas. En una máquina se produce una pieza aunque también pueden aparecer procesos alternativos o de combinación de productos (coproducción). Los inventarios que se consideran son inciertos puesto que las salidas y las entradas de material son continuas, así como los controles de calidad. De este modo, es necesario decidir que es lo que se ha de fabricar en cada momento sabiendo que, el coste de los retrasos/adelantes es diferente según sea su proceso y el del cliente, así como la distancia entre ambos, los costes de almacenamiento de los productos y los costes de preparación de la máquina.

Con todo esto considerando las hipótesis del problema *ELSP* (*Economic Lot Scheduling Problem*) de acuerdo con (Bomberger, 1966) que se presentan a continuación parece que no es una mala consideración asumir que el problema de programación de la producción para los proveedores del automóvil se asemeja al problema *ELSP* (Vidal-Carreras et al., 2005):

- Solo un producto puede ser producido al mismo tiempo
- Existe un coste de *setup* constante y un tiempo de *setup* constante asociados a la producción de cada producto. Los costes y tiempos de *setup* dependen solo del producto que se va a producir (son independientes de la secuencia de producción)
- El ratio de demanda de cada producto es conocido y constante a lo largo de todo el horizonte de planificación. Este horizonte de planificación es infinito y en él toda la demanda debe ser satisfecha

- El ratio de producción de cada producto es conocido y constante
- Para cada producto el coste variable total es la suma del coste de *setup* y el coste de almacenamiento del inventario.

Sin embargo, el fenómeno estudiado en el sector de los proveedores del automóvil y que es el eje fundamental de esta tesis, esto es, la coproducción, presenta una importante modificación a este problema *ELSP*. Concretamente afecta a la primera hipótesis (Vidal-Carreras et al., 2008b) puesto que la coproducción consiste en que la máquina puede producir más de un producto de manera simultánea. Además, como se ha detallado en los ejemplos descritos, se dispone de información de los parámetros asociados al proceso de coproducción (costes, tiempos, ratios de coproducción...) y se permite decidir si se quiere lanzar el proceso de coproducción o realizar el producto de modo tradicional, esto es sin coproducción. Como se describirá en el siguiente capítulo 3 de revisión de la literatura, la primera característica descrita se asocia con el control de la coproducción y la segunda a la elección/deliberación de la coproducción. Con todo esto parece adecuado denominar al problema de esta tesis *DCC-ELSP (Deliberate Controlled Coproduction - Economic Lot Scheduling Problem)*.

Capítulo 3

Estado del Arte

3.1 Introducción

Al revisar la literatura relacionada con el problema que se plantea en esta tesis, es decir, el problema de la coproducción deliberada y controlada en un entorno *ELSP*, se observa la escasa literatura que existe sobre el propio fenómeno de coproducción. Concretamente, el problema tal y como se describe en esta tesis no había sido presentado todavía en el entorno académico. Así, el trabajo de revisión de la literatura se plantea del siguiente modo. En primer lugar, se revisa la literatura relacionada en el campo concreto de la coproducción destacando el hueco que existe en esta área. A continuación, se considera adecuado enmarcar el fenómeno de la coproducción deliberada y controlada en el entorno en el que se encuentra, que como se ha comentado en el apartado anterior es asimilable al problema de programación del lote económico (*ELSP*). Para ello, se revisan los enfoques de resolución del problema, que se han planteado en la literatura y las variaciones al problema original planteadas, que afectan de algún modo al problema planteado en esta tesis.

3.2 Coproducción

De acuerdo con (Deuermeyer y Pierskalla, 1978) es posible afirmar que existe coproducción cuando un proceso productivo da como resultado más de un producto de manera simultánea. La coproducción aparece tanto en ambientes de alta y como de baja tecnología de producción. Aparecen ejemplos en la industria del automóvil (García-Sabater y Vidal-Carreras, 2010; Vidal-Carreras y García-Sabater, 2005), la industria electrónica (semiconductores, diodos, transistores) (Tomlin y Wang, 2008), la industria petroquímica (Lisbona y Romeo, 2008), la

industria del vidrio (Oner y Bilgic, 2008), la industria alimenticia (Bravo et al., 2009) y la industria de la biotecnología (Nielsen et al., 2010).

La coproducción también aparece de algún modo en entornos de problemas de mezcla o ajuste. Por ejemplo, el problema de corte en la industria del vidrio puede verse como un problema de coproducción variable. En (Oner y Bilgic, 2008) aparece este problema presentando una variabilidad aleatoria en el corte, de acuerdo con las imperfecciones del cristal, que puede dar como resultado uno o varios productos. El problema de corte para la industria de leña de madera joven se considera otro ejemplo de este tipo (Gaudreault et al., 2008).

La coproducción, suele ocurrir en entornos de producción en los que algunos procesos no se conocen o no se comprenden perfectamente y/o no están totalmente bajo control. Cuando los parámetros no se conocen o no se comprenden perfectamente hablamos de coproducción incontrolada (Oner y Bilgic, 2008). Sin embargo tal y como se ha podido constatar en la realidad industrial, en ocasiones el proceso de coproducción si se conoce/comprende perfectamente. En este caso aparece la denominada coproducción controlada (Vidal-Carreras y Garcia-Sabater, 2009).

Otro aspecto a considerar en la coproducción es la deliberación de la misma. En algunas situaciones, no se puede escoger o deliberar la producción, puesto que es algo intrínseco al proceso que siempre ocurre, como por ejemplo la diferenciación de la gasolina de acuerdo con los niveles de octano (Bitran y Dasu, 1992). La coproducción deliberada es aquella en la que la coproducción es decidida por el usuario (Vidal-Carreras y Garcia-Sabater, 2009). Tal y como ocurrió con el control de parámetros de la coproducción, se observa como la mayor parte de la literatura revisada, se centra en considerar una coproducción no deliberada, por tanto el concepto de la deliberación de la coproducción, es un aporte muy interesante a la literatura.

Es interesante distinguir claramente estos casos de coproducción, puesto que la mayor parte de la literatura revisada, se centra en el problema de coproducción incontrolada y no deliberada. En los subapartados siguientes se consideran estos conceptos y las referencias asociadas.

3.2.1 No controlada y No Deliberada

Se define coproducción incontrolada, como aquel fenómeno de coproducción en el que no se conocen los parámetros asociados al proceso (ratio de producción, tiempos y costes). En la coproducción incontrolada el valor de salida de los parámetros del proceso es aleatorio. Por ejemplo, en la industria de las fibras ópticas, la longitud del segmento es aleatoria; en la industria del acero, el corte de los lingotes tiene un tamaño aleatorio, en la industria del cristal, las imperfecciones

en el cristal son aleatorias (Taskin y Unal, 2009), en la industria electrónica, la frecuencia de los transistores suele ser aleatoria (Bitran y Gilbert, 1994), y en la industria del petróleo los problemas de combinado o mezcla "*blending*" (Lisbona y Romeo, 2008). Respecto a la consideración de campos aleatorios en la fase lotificación en (Yano y Lee, 1995) se encuentra una revisión de artículos que tratan el tema. La revisión se centra en problemas de una etapa y modelos de un sólo producto (sin coproducción), aunque se destaca que aparecen los "modelos con coproducción" como un apartado de la revisión. Sin embargo, no son excesivas las referencias de artículos incluidas en este apartado (Bitran y Dasu, 1992; Bitran y Gilbert, 1994; Bitran y Leong, 1992).

La coproducción no deliberada es aquella que no se puede evitar, puesto que está embebida dentro del proceso de transformación (Gaudreault et al., 2008). En la mayor parte de la literatura revisada sobre coproducción incontrolada, se presupone que también es no deliberada, aunque esto no esté explícitamente indicado (Oner y Bilgic, 2008). Sin embargo, que sea una coproducción no controlada y no deliberada no implica que no esté planeada y sea deseada (plantas de cogeneración de energía).

En la coproducción incontrolada, el valor de salida de los parámetros del proceso, como la calidad de los productos, pueden ser estocásticos o aleatorios. Como resultado del proceso, aparecen productos con distintas calidades. En este entorno aparece el concepto de subproductos o *byproducts*. Se considera un subproducto como aquel producto secundario, generalmente útil y comercializable, derivado de un proceso de manufactura que no es el producto primario o el servicio que se produce. Se puede definir como producto principal de la coproducción, a aquel que cumple las especificaciones objetivos definidos por el usuario, y subproductos a aquellos productos que no las cumplen completamente. En ocasiones, el producto secundario es un desecho o *scrap* del proceso, al que se le puede sacar una segunda utilidad. En este sentido, no sería estrictamente un desecho porque no se elimina, y se usa para otro proceso distinto. En el caso de coproducción no controlada de subproductos, se podrían encuadrar los estudios que aparecen en la literatura de procesos productivos que cambian de estar bajo control al estado de fuera de control. En ese momento comienzan a producir productos defectuosos y presentan modelos que estudian la sustitución de la demanda y el proceso de producción imperfecto. Sin embargo, de acuerdo con (Oner y Bilgic, 2008) en ellos, la coproducción nunca ha sido reconocida.

Es tal la unión en la literatura entre este concepto de subproducto y la coproducción no controlada y no deliberada, que aparecen áreas productivas que intercambian el significado de coproducción y producción de subproductos (Evans, 1969; Ou y Wein, 1995). En estas áreas, la coproducción genera un conjunto determinado de productos que pueden ser clasificados de acuerdo con una jerarquía. La industria electrónica denomina específicamente *binning* al proceso de

clasificación de los ítems en distintos grados después de su producción. Los grados pueden definirse de acuerdo al rendimiento de los mismos en ciertas especificaciones o de acuerdo con su uso final. De la primera circunstancia se puede citar el ejemplo de los semiconductores, que se clasifican de acuerdo con su velocidad. De la segunda circunstancia, se cita la distinta exigencia en fiabilidad de un transductor empleado para aplicaciones domésticas, frente a uno empleado como aparato para mantener la vida de una persona, como puede ser una máquina de circulación extracorpórea.

Directamente relacionado con el concepto de subproducto, aparece el concepto de la demanda sustituible (Mcgillivray y Silver, 1978). Se entiende como demanda sustituible aquella que puede ser satisfecha por otro tipo de productos. En (Mcgillivray y Silver, 1978) aparecen ejemplos prácticos de ítems que tiene parte de la demanda sustituibles como: (i) los consumidores de determinados productos tales como diferentes marcas de cereales (ii) los productos de ferretería específicos al por menor, como las diferentes marcas de pintura o diferentes tamaños de envases de la misma marca, (iii) cierto tipo de bienes, por ejemplo, dos vestidos del mismo estilo y tamaño, pero de diferentes colores. Cuando la demanda es no sustituible, significa que cada producto dispone de su propio mercado, de modo que el cliente que ha pedido un tipo de producto no está satisfecho si se le entrega otro, aunque sea de un nivel superior. Esto puede ser debido a que la jerarquía que aparece en los productos, no está basada sólo en la calidad. Además esta demanda sustituible puede ser transitiva o no transitiva. Se considera transitiva la sustitución de la demanda, si las demandas de los productos pedidos pueden ser satisfechas con los inventarios de otros siempre que estos sean de un pedido superior. La sustitución de la demanda puede ser considerada en un sólo sentido (Bitran y Dasu, 1992; Bitran y Gilbert, 1994; Bitran y Leong, 1992; Nahmias y Moinzadeh, 1997). Esta transitividad de la sustitución de la demanda requiere especificaciones de los productos anidadas. Es decir, que las especificaciones de productos de pedidos inferiores, estén incluidas en las especificaciones de los productos de pedidos superiores. En el caso de las especificaciones de los productos se encuentren solapadas de forma parcial, se considera una sustitución de la demanda no transitiva (Bitran y Leong, 1995). En (Bitran y Leong, 1995) se trata el mismo problema planteado en (Bitran y Leong, 1992; Bitran y Yanasse, 1984) sólo que en este trabajo, se considera una demanda no transitiva. En este caso, es difícil distinguir el producto principal de los subproductos, debido a que ambos son igual de importantes (Bitran y Leong, 1995). Los autores proponen un sencillo método que pretende transformar los problemas no transitivos en transitivos, para poder aplicar entonces métodos propios de problemas transitivos, a los problemas no transitivos iniciales. Cuando existe transitividad en la sustitución de la demanda, es necesario establecer en cada uno de los periodos productivos cómo almacenar y asignar el inventario disponible, para satisfacer la demanda externa de los productos.

Son muchos los artículos que consideran la demanda sustituible con coproducción no deliberada e incontrolada (Bitran y Dasu, 1992; Bitran y Gilbert, 1994; Bitran y Leong, 1992; Bitran y Yanasse, 1984; Duenyas y Tsai, 2000; Gerchak et al., 1996; Nahmias y Moynzadeh, 1997; Ou y Wein, 1995). Sin embargo, en el trabajo de (Oner y Bilgic, 2008) se estudian los efectos de la coproducción no controlada de varios productos, cuya demanda no es sustituible. Se asume que la producción no se puede controlar por motivos técnicos y/o económicos. En este trabajo, se introducen dos modelos que modifican el enfoque del ciclo común en el *ELSP* con o sin pedidos pendientes. Los resultados muestran que el tiempo de ciclo aumenta con el ratio de coproducción y la utilización del sistema. No parece que existan efectos visibles en los costes a largo plazo. Un ejemplo de esta casuística aparece en la industria del cristal, para ver más detalles consultar el artículo completo citado. La jerarquía que aparece en los productos, no está basada sólo en la calidad, lo que influye directamente en no poder sustituir los productos.

En (Bitran y Dasu, 1992) se presenta un ejemplo de una jerarquía de este calidad, para una empresa que fabrica diodos. En este artículo, los parámetros asociados al proceso son estocásticos. Es interesante destacar el concepto de familias de productos que aparece. Estas familias incluyen productos que a la vez son subproductos unos de otros. En la práctica, los responsables de la producción tienen clara la definición de familia. Para estos, una familia de productos suele incluir a un conjunto mínimo de productos que se almacenan de manera conjunta o cuyos inventarios son compartidos. Dentro de las familias de productos existen autores que aúnan tan solo un proceso junto con su producto y subproductos, mientras que otros consideran que en una familia existe más de un proceso (Bitran y Leong, 1995). Los procesos de la familia de productos pueden estar definidos previamente y ser limitados o por el contrario tratarse de un conjunto muy elevado, puesto que se obtienen a partir de pequeños ajustes en los procesos iniciales. La existencia de más de un proceso en una familia de productos, exige la complicación adicional de la elección del proceso óptimo, para cada uno de los periodos productivos.

En (Bitran y Gilbert, 1994) se considera el mismo problema que en (Bitran y Dasu, 1992) y se añade a la coproducción la complejidad de campos aleatorios. En el entorno de los semiconductores, se plantea el caso de la fabricación de diodos, que está fuertemente afectada por condiciones externas como pueden ser la temperatura, vibraciones o la presencia de polvo en el proceso que afectan a la calidad de la salida de productos. De este modo, en un mismo proceso, salen distintos diodos con variaciones en las especificaciones. Estas características internas son incontrolables para los productores y se encuentran anidadas, de modo que su demanda es sustituible. Se describe un método que permite obtener una cota mínima y varias heurísticas para resolver el problema en la práctica. Para evaluar los métodos planteados se emplea la simulación Monte Carlo.

En (Gerchak et al., 1996) se trabaja en el contexto de un solo periodo y modelos tipo *EOQ*. En la publicación se asume que sólo hay dos tipos del producto, y el producto de grado superior, puede ser sustituido por el producto de menor calidad. Para el caso de un solo periodo, consideran dos escenarios: un proceso que produce dos grados con los rendimientos al azar, y dos procesos diferentes. En uno de estos procesos se producen todos los grados de calidad y en el otro proceso sólo se puede producir el grado más bajo (con un rendimiento aleatorio). Se muestra que las funciones que competen el beneficio esperado son cóncavas. Para los modelos *EOQ*, se asume que una orden es servida sólo cuando ambas calidades del producto se han agotado. En (Gerchak y Grosfeld-Nir, 1999) se generaliza el modelo incluyendo múltiples grados en la sustitución de productos en el entorno *MLPO* (*multiple lotsizing in production to order*). En (Grosfeld-Nir y Gerchak, 2004) se revisa los recientes avances sobre campos aleatorios en el entorno *MLPO*.

En (Nahmias y Moinzadeh, 1997) se considera un entorno de industria electrónica en el que la calidad de la salida se limita a dos niveles diferentes. La distribución de estos niveles de calidad, es una variable aleatoria, que se asume que sigue una distribución log normal. La demanda es sustituible en un solo sentido hacia abajo. Se asume que las demandas de los productos son conocidas y constantes. Los autores revisan la clásica fórmula del *EOQ* para encontrar los puntos de reorden óptimos, considerando que los datos de salida de los productos son estocásticos,

En (Taskin y Unal, 2009), se investiga el problema en el nivel de programación táctica, para la fabricación de vidrio flotado con lotes de coproducción controlada parcialmente, rendimientos aleatorios, producción ininterrumpible, relación compleja entre productos y demanda sustituible. En este trabajo. Se habla de coproducción controlada puesto que se afirma que en la industria fabricación de vidrio flotado, se permite controlar el tipo y la proporción de productos producidos al mismo tiempo, dentro de ciertos límites. Sin embargo tal y como se afirma en las hipótesis del problema, la coproducción es no deliberada puesto que "varios productos se producen al mismo tiempo por la naturaleza de la proceso".

3.2.2 Controlada y Deliberada

Se define coproducción controlada (Vidal-Carreras y Garcia-Sabater, 2009) como aquel fenómeno de coproducción en el que se conocen los parámetros asociados al proceso (ratio de producción, tiempos y costes). Se dice que es deliberada cuando se puede decidir fabricar con coproducción o independientemente cada producto.

El trabajo de (Deuermeyer y Pierskalla, 1978) es el primero conocido que considera coproducción con un rendimiento fijo, por lo que podemos afirmar que esta coproducción está controlada y deliberada. En el artículo, se propone un modelo de control óptimo, para reducir al mínimo los costos de producción, inventarios y pedidos pendientes en un sistema de dos productos. Los procesos de producción

son conocidos y la capacidad es infinita. La demanda de los productos es aleatoria, pero no sustituible. El proceso A produce dos productos 1 y 2, mientras que el proceso B sólo es capaz de producir el producto 2. Estos autores, muestran cómo puede ser óptimo producir artículos en forma conjunta o por separado, dependiendo de las existencias actuales, que se muestran como funciones monótonas. En (Deuermeyer, 1979) se considera el mismo problema con productos perecederos: en la industria láctea con diversos derivados de la leche, en la industria fotográfica con diferentes tipos o tamaños de film fotográfico y en la industria medica con distintos exámenes a partir de un mismo banco de sangre.

En (Vidal-Carreras et al., 2008c) se plantea el problema de la coproducción deliberada y se realiza un estudio sobre la complejidad de la solución, planteando mecanismos alternativos de resolución. (Vidal-Carreras y Garcia-Sabater, 2009) considera una variación de *ELSP* coproducción con diferentes políticas de secuenciación que son simuladas con distintos productos cuyas demandas son no sustituibles.

3.3 Problema de Programación del Lote Económico - *ELSP*

A partir de la descripción del capítulo anterior del entorno en el que se desarrolla la coproducción deliberada y controlada, se ha llegado a la conclusión de que la programación de proveedores en el sector del automóvil, se puede asemejar al problema denominado *ELSP* - Programación del Lote Económico, que a lo largo de este documento se denominará *ELSP*. De acuerdo con la descripción de (Bomberger, 1966), el *ELSP* consiste en la programación de la producción de varios productos diferentes en una única máquina. Esto implica que los ítems se produzcan en lotes que se repiten cada cierto tiempo. Las características relevantes del sistema son las siguientes (Bomberger, 1966; Madigan, 1968), tal y como se indico en las conclusiones del capítulo anterior:

- Solo un producto puede ser producido al mismo tiempo
- Existe un coste de *setup* constante y un tiempo de *setup* constante asociados a la producción de cada producto. Los costes y tiempos de *setup* dependen solo del producto que se va a producir (son independientes de la secuencia de producción)
- El ratio de demanda de cada producto es conocido y constante a lo largo de todo el horizonte de planificación. Este horizonte de planificación es infinito y en él toda la demanda debe ser satisfecha
- El ratio de producción de cada producto es conocido y constante

- Para cada producto el coste variable total es la suma del coste de *setup* y el coste de almacenamiento del inventario

Se puede observar que, para introducir la coproducción, se debe incluir una modificación en el problema tradicional. Concretamente sobre la hipótesis del problema de producir sólo un producto en una máquina. Como se desarrollará más adelante, se considera plantear la revisión del *ELSP* desde el enfoque de las modificaciones planteadas a cada una de las hipótesis.

La solución del problema completo del *ELSP* incluye el establecimiento de la secuencia de fabricación de los distintos ítems (*scheduling*), esto es, decir cuando deben producirse y la determinación de la cantidad a producir de cada uno de ellos, es decir el cálculo del tamaño de lote (*lot sizing*) de manera que se minimicen los costes totales. En (Hsu, 1983) se muestra que incluso una versión muy restrictiva del problema original es NP-duro.

En la literatura se encuentran diferentes aproximaciones para resolver el problema de lotificación del *ELSP*. Estos métodos son: Solución Independiente (IS), Ciclo Común (CC), Periodo Básico (PB), Periodo Básico Extendido (EPB) y Variación del Tamaño de Lote (TVL) y se describen en detalle en posteriores apartados. Como se observará se centran en la búsqueda de patrones cíclicos de producción.

Respecto a la cuestión del establecimiento de la secuencia de producción, en el *ELSP* el número de referencias no son muy numerosas. Una de las primeras reglas de secuenciación se atribuye a (Delporte y Thomas, 1977) que establece una serie de heurísticas para el establecimiento del orden de fabricación de los distintos ítems. En (Dobson, 1987) se incluye en su estudio otra heurística de secuenciación empleada por diversos autores (Gallego y Moon, 1992; Zipkin, 1991). Sin embargo, una de las reglas de secuenciación más sencilla y más empleada por diversos autores a lo largo del tiempo (Brander et al., 2005; Brander y Forsberg, 2006; Gascon et al., 1994; Leachman y Gascon, 1988; Soman et al., 2004a; Soman et al., 2004b; Soman et al., 2006; Soman et al., 2007; Vergin y Lee, 1978), es la planteada por (Segerstedt, 1999), que se basa en el ratio de cobertura o *Run Out*, que se define de acuerdo con lo siguiente:

$$RO_i = I_i / d_i \quad (3.1)$$

Para consultar el significado de las siglas empleadas en la fórmula se remite al siguiente apartado de notación.

3.3.1 Notación

En el *ELSP* clásico la notación es la siguiente (Tabla 3.1) que se empleará en el desarrollo de los enfoques de solución:

Tabla 3.1 Parámetros y variables de decisión *ELSP* clásico

Símbolo	Definición
i	Índice de ítems $i = 1..g$
d_i	Demanda del producto i (unidades por unidades de tiempo)
p_i	Ratio de producción del producto i (unidades por unidades de tiempo)
A_i	Coste de preparación de máquina para la producción del producto i (unidades de tiempo)
h_i	Coste de almacenamiento del producto i (unidades por unidades de tiempo)
c_i	Tiempo de cambio de partida del producto i (unidades de tiempo)
RO_i	Ratio de cobertura del producto i (unidades de tiempo)
T_i	Tiempo de ciclo para el producto i (unidades de tiempo)
T_i^e	Tiempo de ciclo modelo <i>EOQ</i> empujado para el producto i (unidades de tiempo)
T^{cc}	Tiempo de ciclo modelo ciclo común (unidades de tiempo)
CT	Coste total (unidades monetarias)

3.3.2 Enfoques para la Resolución del Problema *ELSP*

3.3.2.1 Solución Independiente

Las primeras contribuciones a la resolución del problema *ELSP* se basan en el modelo propuesto por (Harris, 1913) en el que se plantea la conocida fórmula *EOQ/EMQ*. Esta fórmula *EOQ* presenta un balance entre los costes de *setup* y los costes de inventario en el sistema. Históricamente aunque este modelo *EOQ*, fue desarrollado en 1913 por Ford Whitman Harris un ingeniero que trabajaba en *Westinghouse Corporation* (Ballou, 2004) ha sido incorrectamente citado durante muchos años (Erlenkotter, 1990). Como ejemplo señalar que suele ser conocido como el Modelo de Wilson o la fórmula del tamaño de lote de Wilson (Wilson, 1934). Esto es así porque posteriormente la publicación de Harris, fue analizada a profundidad y aplicada extensivamente por el consultor R.H. Wilson, quien publicó un artículo en 1934 que popularizó el modelo (Wilson, 1934).

A este procedimiento basado en (Harris, 1913) se le denomina Solución Independiente (*IS*) y consiste en el cálculo del tamaño de lote de cada producto de manera aislada, a partir de la fórmula del tamaño de lote económico (*EOQ*). Se denomina independiente ya que ignora la casuística de que varios productos puedan ser producidos en la misma máquina, algo que implicaría compartir la capacidad de esta. De esta forma, el valor obtenido con este método es siempre una cota inferior en el cálculo del coste mínimo del problema. Sin embargo, esta solución es raramente factible por el hecho de considerar cada producto de manera aislada.

El planteamiento matemático para un producto i es el siguiente. La función de costes totales viene dado por (3.2) donde se los costes totales son función del coste del número de *setups* realizados y del coste de almacenamiento de los productos dentro del ciclo T_i .

$$CT = \frac{1}{T_i} A_i + h_i \frac{d_i T_i}{2} \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) \quad (3.2)$$

Para obtener el ciclo que minimiza los costes totales se plantea la primera derivada (3.3) que resulta en (3.4):

$$\frac{\partial C}{\partial T_i} = \frac{\partial \left\{ \frac{1}{T_i} A_i + h_i \frac{d_i T_i}{2} \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) \right\}}{\partial T_i} = 0 \quad (3.3)$$

$$-\frac{1}{T_i^2} A_i + h_i \frac{d_i}{2} \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) = 0 \quad (3.4)$$

Se obtiene el tiempo de ciclo que minimiza los costes totales para un producto i es (3.5):

$$T_i = \sqrt{\frac{2A_i}{h_i d_i \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right)}} \quad (3.5)$$

Mediante manipulaciones algebraicas se obtiene la cota mínima en costes, que es Solución Independiente o LB_{ELSP} , esto es, *lower bound* del *ELSP* para un conjunto de g productos.

$$LB_{ELSP} = \sum_{i=1}^g \sqrt{2A_i h_i d_i \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right)} \quad (3.6)$$

3.3.2.2 Ciclo Común (Common-Cycle-Approach)

Con este modelo propuesto por (Hanssmann, 1962), se busca obtener programas cíclicos de producción de una duración determinada (Ciclo Común) que se repitan periódicamente para un sistema multiproducto. En el programa cada producto será producido una sola vez en cada ciclo. Se pretende obtener un ciclo común de coproducción que siendo capaz de incluir los tiempos de *setup* de cada producto, tenga un menor coste global.

El metodo del ciclo común también es conocido como el ciclo de rotación o método del tornillo. Básicamente en este problema el problema de secuenciación está eliminado. Se trata de un método sencillo y factible, cuya optimalidad no está asegurada. Sin embargo, de acuerdo con (Jones y Inman, 1989), podemos afirmar que si el ratio entre el coste de *setup* y el coste de inventario es equivalente o muy similar para todos los productos, el programa proporcionado por el Ciclo Común está muy cerca del óptimo. Como se describe en (Elmaghraby, 1978) y (Larrañeta y Onieva, 1988) entre otros, los resultados obtenidos con este método proporcionan una estimación de cota superior para el coste del *ELSP*.

El planteamiento matemático es el siguiente. La función de costes totales viene dado por (3.2) donde, los costes totales, son función del coste del número de *setups* realizados y del coste de almacenamiento de los productos dentro del ciclo T .

$$CT = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^g A_i + T \sum_{i=1}^g h_i \frac{d_i}{2} \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) \quad (3.7)$$

Para obtener el ciclo que minimiza los costes totales, se plantea la primera derivada que resulta en:

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{\partial \left\{ \frac{1}{T} \sum_{i=1}^g A_i + T \sum_{i=1}^g h_i \frac{d_i}{2} \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) \right\}}{\partial T} = 0 \quad (3.8)$$

$$-\frac{1}{T^2} \sum_{i=1}^g A_i + \sum_{i=1}^g h_i \frac{d_i}{2} \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) = 0 \quad (3.9)$$

Se obtiene el tiempo de ciclo común T , que minimiza los costes totales:

$$T = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^g A_i}{\sum_{i=1}^g h_i d_i \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right)}} \quad (3.10)$$

Mediante manipulaciones algebraicas se obtiene una aproximación como cota superior para las soluciones del problema *ELSP*, que es UB_{ELSP} , esto es, *upper bound* del *ELSP*. Esta cota se suele emplear en el entorno *ELSP* para evaluar la bondad de las soluciones obtenidas (Larrañeta y Onieva, 1988).

$$UB_{ELSP} = \sqrt{2 \sum_{i=1}^g A_i h_i d_i \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right)} \quad (3.11)$$

En la siguiente Tabla 3.2 sin pretender ser exhaustivos, con toda la literatura existente, se plantean interesantes referencias que emplean el método común de manera aislada o combinado con la SI.

Tabla 3.2 Referencias método del Ciclo Común

Solución Independiente + Ciclo Común	(Madigan, 1968)	Heurística, Condición de Factibilidad, Resultados Experimentales
	(Gallego, 1990)	Modelo Matemático, Secuencia, Back Orders, Potencias de 2
Ciclo Común	(Jones y Inman, 1989)	Modelo Matemático, Resultados Experimentales, Condiciones de Optimalidad
	(Hwang et al., 1993)	Modelo Matemático, Modificación (programación geométrica técnica) Parámetro <i>Setup</i> , Resultados Experimentales
	(Ben-Daya y Hariga, 2000)	Modelo Matemático, Resultados Experimentales, Creación Benchmark, Proceso de Producción Imperfecto
	(Khoury et al., 2001)	Modelo Matemático, Resultados Experimentales, Restricciones de Capacidad, Condiciones de optimalidad, 2 productos
	(Eynan, 2003)	Modelo Matemático, Resultados Experimentales, Modificación parámetros fijos (ratio producción), , Condiciones de Optimalidad
	(Oner y Bilgic, 2008)	Coproducción No controlada y no deliberada

3.3.2.3 Período Básico (Basic-Period-Approach)

Este método presentado por (Bomberger, 1966) consiste en admitir diferentes ciclos para cada uno de los productos pero insistiendo en que cada tiempo de ciclo T_i^e , debe de ser un múltiplo entero del periodo básico que se denomina T_{pb} . Este periodo básico, es la longitud suficiente para acomodar la producción de todos los productos. Este método aunque fue propuesto por (Bomberger, 1966), fue redescubierto por (Dobson, 1987) y (Gallego y Moon, 1992).

Los tiempos de ciclo de los distintos productos i son los siguientes con k_i un número entero:

$$T_i^e = k_i T_{pb} \quad (3.12)$$

El planteamiento matemático es el siguiente. La función de costes totales viene dado por (3.2) donde los costes totales, son función del coste del número de *setups* realizados y del coste de almacenamiento de los productos dentro del ciclo.

$$CT = \frac{1}{T_{pb}} \sum_{i=1}^g \frac{A_i}{k_i} + T_{pb} \sum_{i=1}^g k_i h_i \frac{d_i}{2} \left(1 - \frac{d_i}{p_i} \right) \quad (3.13)$$

En el anexo A.1 se muestra un procedimiento iterativo propuesto por (Doll y Whybark, 1973) para el cálculo del periodo básico T_i^e y los valores de k_i .

En el método del periodo básico, se impone la siguiente condición de factibilidad necesaria que considera la capacidad de la instalación:

$$\sum (c_i + d_i k_i T_{pb}) \leq T_{pb} \quad (3.14)$$

Concretamente, el principal problema de este enfoque es la dificultad de asegurar su factibilidad necesaria y suficiente (Hsu, 1983).

En la Tabla 3.3 que se muestra a continuación, aparecen las principales referencias que se han encontrado en la literatura, que emplean el método del periodo básico.

Tabla 3.3 Referencias Método del Periodo Básico

Periodo Básico	(Bomberger, 1966)	Modelo Matemático, Resultados Experimentales, Benchmark, Factibilidad Asegurada.
	(Stankard y Gupta, 1969)	Heurística, Resultados Experimentales
	(Doll y Whybark, 1973)	Heurística, Resultados Experimentales, Modificación parámetros fijos (<i>setup</i>), Condición de Factibilidad
	(Haessler y Hogue, 1976)	Heurística, Potencias de 2, Condición de Factibilidad
	(Schweitzer y Silver, 1983)	Análítico, Revisión Formulaciones Matemáticas en el coste de optimalidad
	(Hsu, 1983)	Análisis de la complejidad del problema, Resultados Experimentales
	(Leachman y Gascon, 1988)	Simulación de Heurísticas, Demanda Estocástica, <i>Make to stock</i>
	(Davis, 1990)	Restricciones de capacidad, Modelo Matemático, Objetivo Secuencia, Resultados Experimentales, Condición de Factibilidad
	(Hahm y Yano, 1995)	Modelo Matemático, Resultados Experimentales, Potencias de 2, Condición de Optimalidad
	(Tunasar y Rajgopal, 1996)	Heurístico (LES), Condición de factibilidad
	(Goyal, 1997)	Heurístico, Resultados Experimentales, Condición de Factibilidad
	(Khouja et al., 1998)	Heurístico (GA), Resultados Experimentales
(Soman et al., 2004a)	Heurística (B&B), Ítems que caducan, <i>Make to order</i> , Resultados Experimentales	

3.3.2.4 Periodo Básico Extendido (Basic-Period-Extended-Approach)

En (Elmaghraby, 1978) se propone este método que es una extensión del método de Bomberger. Se asume un periodo básico T_{pb} y se representa el tiempo de ciclo mediante múltiplos enteros de T_{pb} . La diferencia es que se consideran dos periodos básicos consecutivos cada uno de duración T_{pb} y se carga los ítems en esos dos periodos básicos. Haciendo esto, la restricción de factibilidad del ciclo común se relaja. El método del periodo básico extendido (*PBE*) domina claramente al método del periodo básico (*PB*) en la calidad de la solución pero requiere un mayor esfuerzo en el desarrollo de la misma. Una de las primeras referencias se encuentra en (Haessler, 1979) y una de las más actuales en (Sun et al., 2010).

3.3.2.5 Modificación de los Tamaños de Lote (Varying-Lot-Sizes-Approach)

El Método de Variación del Tamaño de Lote (*TVL*) atribuido a (Maxwell, 1964) permite distintos tamaños de lote para cualquier producto durante un programa cíclico. Se pretende superar los problemas de factibilidad que pueden acontecer a los otros enfoques (*PB*, *PBE*). Esta formulación permite modificar las órdenes de producción en el tiempo e incluye específicamente los tiempos de *setup* en la formulación del problema. De acuerdo con (Zipkin, 1991), la mayor ventaja de este método es que siempre proporciona un algoritmo factible.

En (Gallego y Shaw, 1997) se mostró que el *ELSP* es NP-duro, incluso en este enfoque de tiempos de ciclo variables.

En la siguiente Tabla 3.4, sin pretender ser exhaustivos con toda la literatura existente, se plantean interesantes referencias que emplean el método de variación del tamaño de lote de manera aislada o combinada.

Tabla 3.4 Método de Variación del Tamaño de Lote

Ciclo Común + Variación del Tamaño de Lote	(Moon et al., 1998)	Modelo Matemático, Heurística, Estabilización del Periodo, Ratio de Fallo de Máquina, Resultados Experimentales
	(Moon et al., 2002a)	Modelo Matemático, Solver Mathematica, Resultados Experimentales
	(Giri et al., 2003)	Modelo Matemático, Heurística, Ratio de Fallo de Máquina, ítems que caducan
Periodo Básico + Variación del Tamaño de lote	(Carstensen, 1999)	Creador del método, Objetivo Secuencia, Modelo Matemático, Solver CPLEX, Potencias de 2, Condición de Óptimo
Variación del Tamaño de lote	(Maxwell, 1964)	Creador del método, Heurística, Adverso regla ZSR
	(Delporte y Thomas, 1977)	Modelo Matemático, Heurística, Análisis de Sensibilidad, Objetivo Secuencia, Resultados experimentales, Adverso ZSR
	(Zipkin, 1991)	Modelo Matemático (FORTRAM-ZELS), Objetivo Secuencia, Heurística, Regla ZSR, Resultados Experimentales
	(Gallego y Roundy, 1992)	Demanda Estocástica, BackOrders
	(Gallego y Shaw, 1997)	Estudio de Complejidad, Modelo matemático
	(Moon et al., 2002b)	Modelo matemático, Heurística (GA), Objetivo Secuencia, Resultados Experimentales
	(Chandrasekaran et al., 2007)	Metaheurísticas: algoritmo genético (GA), una simulación de recocido- Algoritmo (SA) y un algoritmo de colonia de hormigas (ACA) Tiempos de <i>setup</i> dependiente e independiente de la secuencia
	(Yao y Chang, 2009)	Máquinas idénticas en paralelo

3.3.3 Escenario de clasificación para las variantes del ELSP

Como se ha comentado, al ser la coproducción una variación del problema clásico del *ELSP*, se considera adecuado plantear la revisión bibliográfica de acuerdo con modificaciones al *ELSP*. Estas modificaciones planteadas se restringen a las que podrían afectar de algún modo al problema de esta tesis *DCC-ELSP*. La Tabla 3.5 muestra un esquema de clasificación para la revisión de la literatura de las variantes *ELSP*. Esta clasificación se basa en tres aspectos: (i) la característica clásica *ELSP* que se modifica (ii) el tema de investigación relacionado con él y (iii) las variantes concretas que se tratan.

Características del <i>ELSP</i>	Tema de Investigación	Variantes Investigadas
Solo un producto puede ser producido al mismo tiempo	Coproduccion	Coproduccion controlada y deliberada Coproduccion Incontrolada y no deliberada
Existe un coste de setup constante y un tiempo de setup constante asociados a la producción de cada producto	Estructura del <i>setup</i>	<i>Setups</i> dependientes de la secuencia
El ratio de demanda de cada producto es conocido y constante a lo largo de todo el horizonte de planificación que es infinito y toda la demanda debe ser satisfecha	Tipo de demanda Escasez de Inventarios	Demanda Determinista Demanda Estocástica. Pedidos retrasados Perdidas de Ventas
El ratio de producción de cada producto es conocido y constante	Ratios de Producción	Ratios de Producción Rígidoss Ratios de Producción Flexibles

Tabla 3.5 Esquema de la clasificación de las variantes del *ELSP*

Los trabajos revisados son ordenados cronológicamente, de acuerdo con el enfoque en cada criterio de clasificación.

Señalar que una línea de investigación sobre el *ELSP* interesante y de mucha actualidad que no se consideran en esta revisión por no afectar directamente al problema, serían los retrabajos o *reworks*. Estos retrabajos están asociados a la producción de items imperfectos que requieren ser reparados (Chang y Yao, 2009; Chiu et al., 2010a; Chiu et al., 2010b; Haji et al., 2006; Haji et al., 2008; Taleizadeh et al., 2010a; Taleizadeh et al., 2010b; Tang y Teunter, 2006; Teunter et al., 2008; Teunter et al., 2009).

3.3.4 Estructura del Setup

Generalmente el cambio de lote entre productos diferentes suele incurrir en un tiempo y coste para la instalación. Este tiempo comúnmente se denomina tiempo de cambio de partido o de *setup*. Del mismo modo el coste, se denomina coste de cambio de partida o coste de *setup*. La estructura de este *setup* es una característica importante que afecta directamente a la complejidad del problema. Los costes y/o tiempos de preparación de la máquina, normalmente son modelados mediante la introducción de variables en el modelo matemático del problema que complica su resolución.

De acuerdo con (Karimi et al., 2003) hay dos tipos de estructura de *setup*, una estructura simple y otra compleja. Si el tiempo y el coste de *setup* en un periodo son independientes de la secuencia y de las decisiones en períodos anteriores, se denomina una estructura simple de *setup*. Cuando el tiempo y el coste de *setup* en un periodo depende de la secuencia o de los períodos anteriores, se denomina estructura de *setup* compleja. Como se ha visto a partir de las hipótesis del problema *ELSP*, la estructura simple se supone, por lo que el siguiente subapartado se dedica a analizar solo las interesantes referencias importantes sobre la estructura de *setup* compleja.

Sin embargo, respecto a la consideración de una estructura de *setup* simple o independiente de la secuencia es interesante considerar los trabajos de (Fujita, 1978) y (Dobson, 1987) puesto que consideran los tiempos de preparación explícitamente. Del mismo en (Gallego y Moon, 1992) se estudia el posible equilibrio entre la reducción del tiempo de *setup* y el aumento de los costes de *setup*. En su artículo se considera un sistema multi-item y se asume que el tiempo de preparación se puede reducir mediante la externalización del *setup* de determinadas operaciones con un aumento de los costes de *setup*. Se demuestra que esta propuesta puede proporcionar una mejora significativa en sistemas con una alta utilización de las instalaciones de producción. En (Moon, 1994) se considera una reducción en el tiempo de *setup* por una inversión en los costes de *setup* del *ELSP*. En (Hwang et al., 1993) y (Moon, 1994) se desarrolla un modelo *ELSP*, considerando la reducción en el tiempo de *setup* y el incremento de la calidad de los productos a partir de una inversión en los costes de *setup*. En (Darwish, 2008) se considera la relación entre el coste de *setup* y la longitud del ciclo de producción. Se desarrollan dos modelos sin y con escasez de inventarios. Los resultados muestran que esta relación tiene un impacto significativo en el tamaño de lote óptimo y el coste total del modelo *EOQ*. Esta dependencia puede estar relacionada con los efectos del aprendizaje y el deterioro del proceso.

Para una revisión exhaustiva de la influencia de los tiempos y costes de *setup* en los modelos de gestión de inventario se deben considerar (Drexel y Kimms, 1997; Karimi et al., 2003) (Zhu y Wilhelm, 2006). Los trabajos de (Allahverdi et al.,

1999; Allahverdi et al., 2008) presentan una revisión de los problemas de programación de producción con tiempos y costes de *setup* para otros entornos distintos.

3.3.4.1 Estructura de *setup* compleja

Una de las primeras referencias aparece en (Maxwell, 1964). En este artículo se considera el *ELSP* con un *setup* dependiente de la secuencia, concretamente los costes de *setup* son proporcionales al tiempo de *setup*. Se restringe el problema a programas cíclicos de producción sin periodos libres o de inactividad. Con estos supuestos, se demostró que el coste de *setup* por unidad de tiempo es una constante y puede ser ignorado en la determinación de un programa.

En (Geoffrion y Graves, 1976) se resuelve la dependencia de los *setups* en el *ELSP*, mediante el uso de un algoritmo de asignación cuadrático con ajustes de programación lineal. También se describe un ejemplo de aplicación para la programación de un reactor químico.

En (Singh y Foster, 1987) se desarrolla una heurística en un horizonte de planificación finito que combina la solución de un problema de programación con costes de *setup* constantes y la solución del problema del viajante de comercio con unos costes de *setup* dependientes de la secuencia. Sin embargo, todavía supone unos tiempos de *setup* independientes de la secuencia.

En (Galvin, 1987) se trata de resolver el problema del *ELSP* con *setups* dependientes de la secuencia, descomponiendo el problema original en dos subproblemas más pequeños, es decir, un problema de viajante de comercio (*TSP*) y un *ELSP*. Su metodología no determinó las frecuencias de producción de los productos. En el trabajo se resolvió el *TSP* para generar una secuencia de producción, que alimentaba el problema del *ELSP*. Este *ELSP* se resolvía utilizando el enfoque de ciclo común y el enfoque período básico. Sin embargo, su metodología es miope, ya que supone que una secuencia de producción que incurre en los menores costes de *setup* también producirá un programa de producción con menores costes en general. Esto ciertamente no es verdad para todos los casos, ya que puede que los costes de inventario se disparen y son una parte importante del coste total de producción.

De acuerdo con (Lopez y Kingsman, 1991) siguiendo los enfoques del período básico y del período básico extendido del *ELSP*, la única opción posible para incorporar *setups* dependientes de la secuencia es considerar, al principio del periodo, el coste medio de cada producto, para decidir las frecuencias de producción. Estas frecuencias de producción, se utilizan para crear un programa de producción inicial que luego se modifica, con los datos de los tiempos de *setup* dependientes. Este problema es un problema del viajante de comercio con sub-

rutas. Sin embargo, para el enfoque de ciclo común (método que da lugar a una solución en los tiempos de ciclo de cada producto son los mismos y cada producto se produce exactamente una vez durante el ciclo), no se impone ninguna restricción sobre el orden en que se deben producir los productos. Se puede intentar producir primero aquellos productos que reduzcan al mínimo el tiempo de *setup* total del ciclo. Estos valores se pueden utilizar en el cálculo del tiempo de ciclo óptimo.

En (Dobson, 1992) se desarrolla un modelo para resolver las frecuencias de producción a través de la transformación y relajación lagrangiana del problema. Para lograr la separación parcial del problema integrado de lotificación y del viajante de comercio, el modelo supone que los *runs* de producción debieran ser iguales de tiempo, ignorando así las consecuencias de inventario debidas a la secuencia y *timing* de la producción. Al relajar las restricciones de integralidad de las frecuencias de la producción, se resuelve el modelo de optimización subgradiente. Una vez determinadas las frecuencias de producción, se emplea una secuencia de tiempo y un procedimiento heurístico para determinar la secuencia de producción, tiempo de ciclo de producción y la producción y los de tiempos producción y libres (*idle*). Su heurística funciona muy bien, cuando la utilización de la máquina y la diversidad de *setups* son bajos. Pero la calidad de las soluciones se deteriora drásticamente a medida que, aumenta la utilización de la máquina o aumenta la diversidad de la instalación.

En (Taylor et al., 1997) se desarrolla un algoritmo heurístico para encontrar una solución para el problema de programación con *setups* dependientes de la secuencia. A diferencia de los métodos existentes hasta el momento, el algoritmo elimina la necesidad de crear nuevos problemas artificiales y la aplicación de pruebas de factibilidad. También elimina la tediosa tarea de traducir las relaciones de *setups* a programación matemática. El resultado es una técnica de solución conceptualmente simple que muy fácil de implementar en la realidad industrial, pues realmente la solución fue concebida específicamente para esta.

En (Oh y Karimi, 2001a; Oh y Karimi, 2001b) se presenta una metodología para la resolución del *ELSP* en una única máquina con configuraciones dependientes de la secuencia y un horizonte de planificación finito. Para ello, el problema es descompuesto en dos subproblemas: uno implica la lotificación y el otro la programación y la secuenciación de los lotes de acuerdo con una programación lineal entera mixta (*MINLP*). Utilizando un enfoque de módulos de programación, transforman este *MINLP* en un *MILP* y proponen un algoritmo y dos heurísticas para la resolución del *MILP*. Es importante tener en cuenta que este modelo funciona igual de bien en problemas con *setups* independientes de la secuencia.

En (Wagner y Davis, 2002) se propone un procedimiento heurístico para resolver el problema *ELSP* dependiente de la secuencia utilizando el enfoque del ciclo común

de (Hanssmann, 1962). Se crea una secuencia de producción similar a (Delporte y Thomas, 1977; Maxwell, 1964). Se plantea un procedimiento de búsqueda para determinar la secuencia de producción y evaluar las secuencias con un programa lineal para determinar exactamente: el mejor programa dado un proceso de producción, las cantidades de producción, los niveles de inventario, el tiempo de inicio y fin de la producción y el tiempo de ciclo. La heurística propuesta es capaz de determinar una serie de soluciones óptimas, y es especialmente útil en entornos de fabricación de baja utilización.

3.3.5 Tipo de Demanda

El tipo de demanda se considera como una entrada en el modelo *ELSP*. Se puede distinguir entre demanda determinista y demanda estocástica. La demanda determinista es aquella que se conoce en cada momento, puede ser siempre la misma (constante) o cambiar (dinámica), pero se conoce de antemano.

Si se considera una demanda que no es conocida con anterioridad pues es aleatoria, el tipo de demanda más citado en la literatura relacionada con el *ELSP* es la demanda estocástica. La demanda estocástica es aquella que sigue una regla de probabilidad. La demanda estocástica estacionaria es aquella que sigue una regla de probabilidad estable en el tiempo. Por ejemplo: una distribución de la demanda que sigue una distribución normal con una media y una desviación típica constantes en el tiempo. La demanda estocástica no estacionaria es aquella que sigue una regla de probabilidad no estable en el tiempo. En muchas aplicaciones prácticas la incertidumbre de la demanda es un factor complicado puesto que las tasas de demanda de bienes y servicios pueden variar enormemente entre ellas.

3.3.5.1 Demanda Determinista

El modelo clásico del *ELSP* se basa en el supuesto de demandas deterministas constantes. Es por ello que por la estructura de esta revisión de la literatura no se considera explícitamente.

3.3.5.1.1 Demanda Determinista dinámica

El trabajo de (Wagner y Whitin, 1958) fue de los primeros en tratar el problema de un único producto en una única máquina con demanda dinámica. En este trabajo, se emplea la programación dinámica para encontrar la solución óptima, pero se supuso que la producción era instantánea y que la capacidad de la máquina es ilimitada. En los trabajos de (Dixon y Silver, 1982; Dogramaci et al., 1981; Newson, 1975a; Newson, 1975b; Vannunen y Wessels, 1978) emplean técnicas heurísticas para solucionar el *ELSP* con demanda determinista dinámica. Un modo de solución mediante programación dinámica, para el caso en el que el coste de almacenamiento es una función del inventario agregado y hay costes de *setup*, ha

sido desarrollada por (Leachman et al., 1991), basándose en la labor de (Glasse, 1968).

3.3.5.2 Demanda Estocástica

En (Sox et al., 1999) se realiza un estado del arte del problema de programación del lote económico con demanda estocástica (*SELSP*), definido como el problema del *ELSP* con demanda estocástica. En este trabajo se llega a la conclusión de que la versión determinista del problema está investigada ampliamente en la literatura, mientras que el problema estocástico no está tan investigado.

3.3.5.2.1 Demanda Estocástica Estacionaria

En (Vergin y Lee, 1978) se propuso por primera vez testear políticas de programación dinámica basadas en la retroalimentación de los niveles de inventario. Se considero una demanda estocástica estacionaria y se simularon seis políticas de inventario diferentes. En las simulaciones realizadas en (Vergin y Lee, 1978) se demuestra que las políticas que tengan en cuenta los niveles actuales de inventario en la toma de decisiones de planificación superan las políticas cuyas programas se basan exclusivamente en las soluciones de una *ELSP* (modelo determinista).

En (Graves, 1980) se desarrolló una política de programación dinámica para el caso de la demanda estocástica estacionaria. En el enfoque de (Graves, 1980) se consideran problemas de decisión de Markov de un solo ítem que deben ser resuelto para establecer los parámetros de control de los n elementos.

Más recientemente, en el artículo de (Brander et al., 2005) se examina si un modelo determinista se puede emplear si la demanda es estocástica estacionaria. Para cumplir con este objetivo se realiza un estudio de simulación, investigando los efectos de la variación de los ratios de demanda. Dos modelos diferentes se utilizan para calcular tamaños de los lotes de productos diferentes y la producción de estos se simula el paso del tiempo. Los modelos utilizados para el cálculo de los tamaños de los lotes es un método de programación dinámica presentada por (Bomberger, 1966) y un método heurístico presentado por (Segerstedt, 1999). Su conclusión es que un modelo determinista de este tipo se puede utilizar en una situación práctica, donde la tasa de demanda es estacionario estocástico, pero los modelos deben complementarse con una regla de decisión, que informe que el artículo a producir y cuándo producir. Este estudio indica que el modelo utilizado para la determinación del tamaño de los lotes es de menor importancia que la regla de decisión utilizada.

3.3.5.2.2 Demanda Estocástica no estacionario o dinámica

La demanda estocástica también puede ser dinámica, en cuyo caso su valor cambia con el tiempo.

Para la demanda dinámica en (Leachman y Gascon, 1988) se desarrolló un procedimiento heurístico basado en ELSP utilizando ciclos objetivos combinados con un ajuste continuo de los ciclos de producción. Su objetivo era adecuar la cantidad de inventarios de acuerdo con los tiempos de RO, para equilibrar el efecto de los cambios de la demanda aleatoria.

En (Kim y Lee, 1989) se presenta un sistema de producción contra inventario, considerando la demanda probabilística y la capacidad de producción limitada

En (Gallego, 1990) se utiliza la teoría de control óptimo para encontrar un programa cíclico objetivo óptimo y una política recuperación lineal para el caso de la interrupción de la programación cíclica. En (Bourland y Yano, 1997) se examina el uso de la holgura de la capacidad e inventarios de seguridad en el *SELSP*. En este trabajo se emplea política de revisión continua de inventarios y presentan un programa matemático que determina la longitud del ciclo, la asignación de tiempos de inactividad entre la fabricación de productos, y los inventarios de seguridad.

En (Maes y Vanwassenhove, 1991) se abordó el caso de dinamismo de la demanda y se trató de generalizar su único producto, una heurística A/B/C. Pero el método resultante no garantiza que las limitaciones de capacidad se cumplan, si los tiempos de proceso son diferentes entre máquinas o si hay más de dos máquinas que participan en el proceso de producción.

En (Goncalves et al., 1994) se abordó el problema de una sola etapa, pero con varias máquinas. Se consideran demanda estocástica y variante en el tiempo y se muestra un modelo de optimización no lineal entero para asignar elementos a las máquinas y programar las cantidades de producción para el período siguiente. Se utilizaron pruebas de simulación para mostrar el comportamiento prometedor de la propuesta. Otra referencia es (Altiok y Shiue, 1994).

En (Gascon et al., 1994) se considera el caso de demanda estocástica no estacionario para una máquina con simulación para heurísticas diseñadas para el problema determinista. En (Kelle et al., 1994) se proporciona un modelo para determinar el programa objetivo y los inventarios de seguridad necesarios para minimizar la suma de costes de *setup* y almacenamiento sujeta a una restricción del nivel de servicio. Utilizan un procedimiento similar al de (Doll y Whybark, 1973), pero también incluyen inventarios de seguridad que, a su vez, dependen de la duración del ciclo.

En (Boctor y Poulin, 2005) se resuelve el *ELSP* multi-producto, multi-etapa con demanda dinámica.

3.3.6 Escasez de Inventarios

De acuerdo con la condición clásica de *ELSP*, de que la demanda se debe cumplir en los períodos en el que se producen, un tema de investigación que no cumple esta condición es la escasez de inventarios. Cuando está permitida la escasez de inventarios se plantea: satisfacer la demanda del período actual en ejercicios futuros, que serían los denominados pedidos pendientes (*backlogging or backorder*) o no satisfacer la demanda, acarreando unas pérdidas de ventas.

Algunos de los modelos que permiten *backordering* de la demanda insatisfecha se encuentra en (Altiok y Shiue, 1994; Dodin, 1984; Dodin, 1985; Gallego y Roundy, 1992; Gupta, 1992). Este último amplió el enfoque del tamaño de lote variable para el *ELSP* permitiendo los pedidos pendientes. En (Altiok y Shiue, 1994), se consideraron pedidos pendientes cuando las demandas y los tiempos de proceso de todos los productos son al azar. En (Altiok y Shiue, 1995) se consideraron como pérdidas de ventas. Referencias actuales que incluyen pedidos pendientes son (Brander et al., 2005; Gurgur y Altiok, 2008; Moon et al., 1998; Oner y Bilgic, 2008).

3.3.7 Ratios de Producción

Tradicionalmente, la velocidad de proceso, esto es, ratio de producción, es elegida de acuerdo a la capacidad de la máquina. A esta ratio de producción se le denomina ratio nominal o velocidad nominal. El enfoque tradicional de producción considera producir todos los artículos a la velocidad nominal (tasa más rápida), con el fin de producir la cantidad requerida, tan pronto como sea posible. De este modo se busca dejar libre a la máquina para hacer otros productos. El ratio de producción de la máquina para un determinado artículo se supone que es inflexible (Hax y Candea, 1984). Sin embargo, en ocasiones los ratios de producción de la máquina se pueden cambiar fácilmente (Schweitzer y Seidmann, 1991). En (Arizono et al., 1989) se analizaron los efectos en el control de inventarios al variar los ratios de producción. Se mostró un sistema en el que es mucho más efectivo controlar y variar las tasas de producción, que mantenerlas fijas.

En (AlFawzan y AlSultan, 1997) se propone que la hipótesis de un ratio de producción constante puede no ser real. Aún cuando este supuesto es real, se podría minimizar el coste total de producción mediante el ajuste del ratio de producción. Hay muchas situaciones donde el control del ratio de producción puede afectar el coste total del sistema de producción. Se pueden considerar, por ejemplo, los siguientes efectos:

El efecto del ratio de producción sobre la vida útil del producto. En muchos sistemas de producción, algunos artículos pueden tener una vida útil finita, que puede ser más corta que el tiempo de ciclo de producción. Como se señala en

(Silver, 1989) y (Sarker y Babu, 1993), la reducción de la tasa de producción puede ser una de las soluciones para ese problema.

El efecto del ratio de producción en la calidad del producto. En (Khouja y Mehrez, 1994) se muestra que en ocasiones la calidad del producto se deteriora con el aumento del ratio de producción.

El efecto del ratio de producción en la acumulación de inventarios. En (Gallego, 1993) se muestra que una reducción en los ratios de producción resulta en una reducción en el capital medio invertido en el inventario y, en consecuencia en los costes medios de inventario.

En esta sección se analizan las situaciones en las que, las tasas de producción no son deterministas ni constantes, sino son una variable que puede ser elegida en el problema.

Existen dos enfoques para reducir la tasa de producción (Gallego, 1993): (i) el enfoque "rígido" en el que se puede escoger un ratio de producción más lento que el ratio nominal, pero una vez que dicho ratio se ha seleccionado no se puede modificar durante un *run* de producción de un artículo, o (ii) el enfoque "flexible" que permite modificar el ratio de producción durante la ejecución.

3.3.7.1 Enfoque Rígido

En (Buzacott y Ozkarahan, 1983) y (Silver, 1990) se empleó el enfoque rígido, para demostrar el ahorro de costes asociados con la reducción de las ratios de producción. En el estudio, se mostró que sólo se debe reducir el ratio de producción de un solo producto y mantener la producción de los demás productos, a su velocidad nominal.

En (Buzacott y Ozkarahan, 1983) se estudia el caso de un sistema de dos productos. En primer lugar, se clasifican los productos de acuerdo con su coste unitario, a continuación, se muestra que sólo el producto con el menor coste unitario debe producirse a mayor velocidad. En (Silver, 1990) se estudió un sistema multi-producto, con la aproximación del ciclo común. Se mostró que al menos un producto debería desacelerar su ritmo de producción. En el trabajo, se obtiene el ratio de producción óptima y la duración del tiempo de ciclo.

En (Allen, 1990) se modificó el *ELSP* para permitir que los ratios de producción sean variables de decisión. Se desarrolló un método gráfico para encontrar los ratios de producción y tiempos de ciclo para un problema de dos productos.

En (Gallego, 1993) se desarrollo un algoritmo basado en un fuerte límite inferior, derivando procedimientos para la solución de los *ELSP*, con reducciones del ratio producción para el caso rígido y flexible para un solo elemento. En este artículo se

parte de un ciclo común aunque no es impuesto para todos los items, ya que puede conducir a malas soluciones.

En (Khouja y Mehrez, 1994) se extiende el problema de producción del tamaño de lote económico, para los casos en los que el ratio de producción es una variable de decisión, y el coste unitario de producción es función de ese ratio de producción. Además, la calidad del proceso de producción se deteriora con el aumento del ratio de producción. Se propone un modelo y se resuelve, los resultados muestran que, para los casos en los que el incremento en la tasa de producción conduce a un deterioro significativo en la calidad, el ratio óptimo de producción, puede ser menor, que el ratio que minimiza el coste unitario de producción. Para los casos en los que la calidad no depende mucho del ratio de producción, el ratio de producción óptimo puede ser mayor que aquel que minimiza el coste unitario de producción. En (Khouja, 1997) se amplía este estudio de sistemas con una alta utilización.

En (AlFawzan y AlSultan, 1997) se extendió el modelo de (Jamal y Sarker, 1993) para el caso en que el ratio de producción es una variable de decisión. Se desarrollaron dos modelos matemáticos considerando o no la posibilidad de la escasez de inventarios, y suponiendo que la demanda es discreta. Ambos modelos dan la cantidad óptima de producción y el ratio de producción óptimo usando algoritmo de Hooke y Jeeves búsqueda debido a (Larsen, 1997) es otra referencia de enfoque rígido.

En (Moon y Christy, 1998) se extiende el trabajo de (Silver, 1990) considerando también límites inferiores para las velocidades de producción (además de los límites superiores ya considerados). También tener en cuenta dos costes de fabricación diferentes que son funciones de la tasa de producción: (1) el coste de operación de la instalación, y el coste (2) del molde. El coste de operación, se modela como una función lineal creciente de la relación entre la tasa de demanda y tasa de producción. Y el coste del molde se modela como una función exponencial decreciente. También se considera un coste de producción que se incrementa con el ratio de producción. Se desarrolla un modelo matemático y un procedimiento heurístico iterativo. El objetivo de este problema es reducir al mínimo los costes anuales, relacionados con la producción de un modelo cuyas variables de decisión son, el tiempo de ciclo común ciclo de producción y el ratio de producción de cada producto

En (Eiamkanchanalai y Banerjee, 1999) se sugiere que el coste de producción por unidad, es una función cuadrática del ratio de producción, en un esfuerzo por controlar su efecto. Se restringen al enfoque rígido del ratio de producción, pero con la consideración explícita de las consecuencias de la capacidad ociosa y la posibilidad de seleccionar un ratio de producción. Esta velocidad puede ser mayor o menor que la velocidad nominal (la mayoría de estudios previos considera principalmente sólo una reducción de los ratios de producción).

En (Khouja, 1999) se analizó el enfoque rígido con una calidad imperfecta, donde el nivel de calidad se deteriora con el incremento del tamaño de lote y el ratio de producción.

3.3.7.2 Enfoque flexible

La flexibilidad de volumen en (Sheti y Sheti, 1990) se define como la capacidad de operar de manera rentable en niveles de producción diferentes. Esto permite al sistema ajustar el ratio de producción hacia arriba o hacia abajo dentro de los límites establecidos.

En (Moon et al., 1991) se analizó el enfoque flexible con las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker y presentó un procedimiento iterativo de solución. Se supone que los ratios de producción se pueden cambiar durante el *run* de producción. En su artículo, se clasifican los elementos de acuerdo con su coste de almacenamiento alto o bajos. Los productos con alto coste de inventario son producidos inicialmente para satisfacer la demanda y cambian los ratios de producción, y los productos con bajos costes de almacenamiento son siempre producidos a sus ratios máximos. Sin embargo este modelos esta basado en las suposiciones de que el proceso (materias primas) puede responder a los cambios de ratios de producción y esto no incurre adicionales cambios de *setup*.

En (Cheng, 1991) se abordaron las cuestiones del programa de reposición óptimo, para el sistema de inventario de artículos que se deterioran, de acuerdo con una tasa constante de deterioro, con una demanda y unos ratios de producción variables con el tiempo. En este artículo, se investiga la importancia de la relación entre el ratio de producción y la tasa de demanda para determinación de la política de inventario.

En (Khouja y Mehrez, 1994) se consideran los ratios de producción variables y se extiende el modelo clásico del *ELSP* al caso en el que el ratio de producción es una variable de decisión y el proceso productivo es imperfecto, asumiendo que la demanda es continúa.

En (Balkhi y Benkherouf, 1996) se estudiaron políticas óptimas para la reposición en un sistema contra inventario. En este sistema los productos se deterioran a un ritmo constante y la tasa de la demanda y el ratio de producción, son variables dentro de un horizonte finito. Para probar la existencia y unicidad de la solución para el sistema, se plantearon lemas y un teorema. Sin embargo, su prueba de los lemas y del teorema no es satisfactoria, es incluso errónea (Chen, 2002).

En (Elhafsi y Bai, 1997) se considera el enfoque de ciclo común y pedidos pendientes. Analíticamente, se obtiene la solución óptima para el problema con dos productos y para el caso m-producto se propone un algoritmo basado en el

algoritmo *Zoutendijk* de (Bazaraa et al., 1979) que no necesita ni utiliza un algoritmo lineal de búsqueda de línea, ni la resolución de un subproblema de programación lineal.

Es interesante señalar que en los trabajos de (Moon et al., 1991), (Gallego, 1993) y (Elhafsi y Bai, 1997) no se considera ningún coste de producción. En sus artículos sólo se consideran los costes de *setup* y los costes de inventario.

En (Bhunja y Maiti, 1997) se presentan dos modelos de inventario determinista para un solo elemento. Para el primer modelo, el ratio de producción en cualquier instante depende del nivel inventario disponible y para el segundo modelo, de la demanda dependiente. Sin embargo, en ambos casos, la tasa de demanda en cualquier momento del tiempo, es una función lineal del tiempo para el período de programación. Ambos modelos se han formulado y resuelto sin escasez de inventarios.

En (Su y Lin, 2001) se presenta un modelo de producción contra inventario de productos que se deterioran en los que el ratio producción en cualquier instante depende de la demanda y del nivel de inventario. Se asume que la tasa de demanda disminuye de manera exponencial, que está permitida la escasez de inventarios y el exceso de demanda se retrasa. Se presentan las expresiones óptimas para el período de programación de producción, el nivel de inventario máximo, la cartera de pedidos sin cubrir y el coste total promedio. También se presenta la sensibilidad de estas soluciones, a los cambios de valores de los parámetros subyacentes.

De acuerdo con (Eynan, 2003) en los artículos de los últimos años se ha sugerido que cuando las máquinas están subutilizadas, las mayores reducciones de costes se pueden obtener, al disminuir el ratio de producción y considerando tiempos de inactividad (holgura).

En (Yan y Kulkarni, 2008) se considera un sistema de una sola etapa en el que los ratios de demanda y de producción son modulados por un proceso de modelado de cadena de *Markov* de Tiempo Continuo (CTMC). El modelo se extiende para permitir *backlogging*.

3.3.8 Evaluación de las heurísticas

3.3.8.1 Benchmarks

La mayor parte de las propuestas tanto analíticas como heurísticas relacionadas con el problema de programación del lote económico, son evaluadas mediante datos experimentales. En algunos de estos artículos se proponen conjuntos de datos estableciendo lo que comúnmente se denomina *benchmarks* (Ben-Daya y

Hariga, 2000; Bomberger, 1966; Eilon, 1957; Johson y Montgomery, 1974; Mallya, 1992; Rogers, 1958; Silver, 1990; Silver et al., 1998; Yao y Elmaghraby, 2001). De esta forma, se permite que otros autores hagan referencias a estos "juegos de datos" o *benchmarks* durante el desarrollo de sus chequeos. Realmente esta es la situación más habitual, estos *benchmarks*, en su estado puro o ligeramente modificados, son empleados por los diversos autores como punto de referencia en la comparación de los resultados de sus algoritmos. En la siguiente tabla (Tabla 3.6) se detalla para diversos autores el tipo de benchmark empleado.

Como puede observarse el benchmark más utilizado es el propuesto por (Bomberger, 1966), que contempla distintas características para 10 productos. En el caso de que sean necesarios gran cantidad de conjuntos diferentes de datos algunos autores establecen procedimientos para su creación (Hahm y Yano, 1995; Karmarkar y Schrage, 1985; Zipkin, 1991).

Tabla 3.6. Empleo de *Benchmarks*

	(Ben-Daya y Hariga, 2000)	(Mallya, 1992)	(Silver et al., 1998)	(Bomberger, 1966)	(Rogers, 1958)	(Eilon, 1957)
(Madigan, 1968)				X		
(Stankard y Gupta, 1969)				X		
(Doll y Whybark, 1973)				X	X	
(Haessler y Hogue, 1976)				X		X
(Haessler, 1979)				X		X
(Jones y Inman, 1989)				X		
(Goyal, 1997)				X		
(Segerstedt, 1999)				X		
(Moon et al., 2002b)	X		X	X		X
(Moon et al., 2002a)		X		X		
(Soman et al., 2006)				X		
(Soman et al., 2004b)				X		

3.3.8.2 Simulación

En la literatura existen varios artículos que emplean técnicas de simulación para la evaluación de heurísticas en la resolución del problema del *ELSP* modificado. Esto es así puesto que como se ha comentado en el apartado del estado del arte en la práctica es común que alguna de las características del *ELSP* clásico aparezca modificada. Concretamente los artículos que nos disponemos a comentar presentan

un *ELSP* con una tipología de la demanda y las características del producto/proceso especiales. De acuerdo con la Tabla 3.7, aparecen simulados sistemas productivos con demanda estocástica (Brander et al., 2005; Gascon et al., 1994; Leachman y Gascon, 1988; Vergin y Lee, 1978), sistemas híbridos de producción contra stock y bajo pedido (Soman et al., 2006) la coproducción deliberada (Vidal-Carreras et al., 2008a), y la influencia del modo de cálculo de los inventarios (Nilsson y Segerstedt, 2008). Como se puede observar en la tabla en algunos casos se prueban las mismas heurísticas modificando las condiciones de entrada de las mismas.

En (Vergin y Lee, 1978) se propuso por primera vez probar políticas de programación basadas en la retroalimentación de los niveles de inventario. Su estudio consiste en la simulación de la programación de seis reglas o políticas definidas para demanda determinista bajo circunstancias de costes y parámetros del sistema variables. Se presentaron seis heurísticas. Las dos primeras heurísticas planteadas inicialmente para demandas deterministas son las siguientes: una heurística basada en el tamaño del lote económico para la producción para varios productos (*EOQ*), y una heurística basada en la misma *EOQ* con modificaciones de modo que incorpore costes por retrasos. Las otras cuatro reglas son propias de la programación dinámica y son las siguientes: la Regla de Magee (Magee y Boodman, 1967) y tres modificaciones de esta regla que incorporan respectivamente: un nivel máximo para el inventario, la existencia de pedidos retrasados y la eliminación de ciclos muy cortos de producción. El sistema asume que 10 productos diferentes son fabricados en una sola máquina.

En el artículo de (Leachman y Gascon, 1988) se simulan cuatro reglas para cinco productos con demanda dinámica estocástica en una sola máquina. Las reglas son las siguientes: una heurística de longitud de ciclo dinámica propuesta por los autores en ese artículo, una heurística basada en la fabricación de cantidades económicas independientes (*EOQ*) para cada producto, una heurística basada en el procedimiento para el cálculo del tamaño de lote de (Doll y Whybark, 1973), y una heurística que emplea las reglas de programación dinámica planteadas en (Vergin y Lee, 1978) que son realmente modificaciones de la heurística planteada en (Magee y Boodman, 1967). Se realiza la simulación con 5 artículos producidos en una sola máquina.

Tabla 3.7. Resumen Literatura Relacionada con la Simulación de Heurísticas para el *ELSP* modificado

	Demanda	Ítems	Nº	Heurísticas Simuladas
Vergin y Lee (1978)	Estocástica	MTS	10	1 Basada en <i>EOQ</i> Basada en <i>EOQ</i> modificada con pedidos 2 retrasados (shortage) 3 Regla de Magee 4 Regla de Magee modificada con niveles máximos de inventario 5 Regla de Magee modificada con Pedidos Retrasados 6 Regla de Magee modificada sin ordenes de producción muy cortas
Leachman y Gascon (1988)	Estocástica	MTS	5	1 Basada en <i>EOQ</i> 2 Basada en Doll&Whybark Regla de Magee modificada con niveles máximos de inventario, pedidos retrasados 3 y sin ordenes de producción demasiado cortas 4 Longitud de ciclo dinámica (propio autor)
Gascon (1988)	Estocástica	MTS	5	1 Lookahead (propio autor) 2 Basada en <i>EOQ</i> 3 Basada en Doll&Whybark Regla de Magee modificada con niveles máximos de inventario, pedidos retrasados 4 y sin ordenes de producción demasiado cortas
Gascon et al. (1994)	Estocástica	MTS	5	1 Basada en <i>EOQ</i> 2 Basada en Doll&Whybark Regla de Magee modificada con niveles máximos de inventario, pedidos retrasados 3 y sin ordenes de producción demasiado cortas pedidos retrasados y sin ordenes de producción demasiado cortas 4 Longitud de ciclo dinámica 5 Longitud de ciclo dinámica mejorada 6 Lookahead
Soman et al. (2004)	Estocástica	MTO-MTS	10 (Bomberger)	1 Basada en <i>EOQ</i> Regla de Magee modificada con niveles máximos de inventario, pedidos retrasados 2 y sin ordenes de producción demasiado cortas 3 Longitud de ciclo dinámica 4 Debida a Fransoo (1993)
Brander et al. (2005)	Estocástica estacionaria	MTS	4	1 Programación Dinámica Bomberger 2 Debida a Segerstedt (1999)
Vidal-Carreras y García-Sabater (2009)	Estocástica	MTS	10 (Bomberger) Coproduction	1 Basada en <i>EOQ</i> 2 Basada en Doll&Whybark 3 Debida a Fransoo (1993)
Nilsson y Segerstedt (2009)	Estocástica	MTS	10 (Bomberger) Coproduction	1 Segerstedt (1999) modificada 2 Basada en Doll&Whybark 3 Debida a Goyal

En Gascon (1988) se simulan cuatro heurísticas para 5 artículos. En (Gascon et al., 1994) se simulan seis heurísticas diferentes para 5 artículos con demanda estacionaria, con y sin errores de previsión, y con demanda dinámica. Las heurísticas simuladas son las siguientes: la regla de (Magee y Boodman, 1967) modificada tal y como muestra (Vergin y Lee, 1978), la heurística denominada por los los autores *lookahead* (Gascon, 1988), la heurística de longitud de ciclo dinámica (Leachman y Gascon, 1988) y la heurística de longitud de ciclo dinámica mejorada (Leachman et al., 1991), y dos más sencillas: una heurística basada en la fabricación de cantidades económicas independientes (*EOQ*) para cada producto, una heurística basada en el procedimiento para el cálculo del tamaño de lote de (Doll y Whybark, 1973).

En (Soman et al., 2006) se simulan cuatro políticas de programación dinámica para los 10 productos de Bomberger modificados. Los datos son modificados de modo que incluyen productos bajo pedido (MTO) y contra stock (MTS). Esta circunstancia es común en muchas industrias. Se simulan cuatro heurísticas: una heurística basada en la fabricación de cantidades económicas independientes (*EOQ*) para cada producto, una heurística basada en el procedimiento para el cálculo del tamaño de lote de (Doll y Whybark, 1973), la heurística de (Fransoo, 1993) y la heurística de longitud de ciclo dinámica (Leachman y Gascon, 1988).

En (Brander et al., 2005) aparece un estudio de simulación que emplea el método de programación dinámica de (Bomberger, 1966) y un método heurístico de (Segerstedt, 1999) para calcular los tamaños de lote para cuatro productos con demanda estocástica estacionaria.

Por último, en (Nilsson y Segerstedt, 2008) se plantea la influencia del modo de cálculo del coste de los productos que se almacenan.

De los trabajos de todos estos autores, se podría plantear dos conclusiones principalmente. Por una parte, que las políticas que consideran los niveles de inventario actuales y disponen de una regla de secuenciación adecuada, superan en resultados a las heurísticas cuyos resultados que se basan exclusivamente en las soluciones para el modelo determinista del *ELSP*. Por otra parte, que los métodos que funcionan adecuadamente para la resolución del *ELSP* clásico, no necesariamente responden del mismo modo, cuando se modifican las condiciones clásicas del *ELSP*.

3.4 Conclusiones

Se ha revisado la bibliografía relacionada con el problema *DCC-ELSP*, destacando como el problema descrito en esta tesis, no había sido presentado hasta la fecha en la literatura. Se define coproducción controlada como aquel fenómeno de

coproducción en el que se conocen los parámetros asociados al proceso (ratio de producción, tiempos y costes). Se dice que es deliberada cuando se puede decidir fabricar con coproducción o independientemente cada producto (Vidal-Carreras y Garcia-Sabater, 2009). Se puede afirmar que es la presentación del problema pues solo se encuentra una referencia que parece estar en la misma línea (Deuermeyer y Pierskalla, 1978) pero desde un punto de vista radicalmente distinto. Así se distingue claramente entre las referencias encontradas que versan sobre coproducción no controlada y no deliberada (Bitran y Leong, 1995; Bitran y Dasu, 1992; Bitran y Gilbert, 1994; Bitran y Leong, 1992; Bitran y Yanasse, 1984; Gerchak et al., 1996; Nahmias y Moinzadeh, 1997; Oner y Bilgic, 2008; Ou y Wein, 1995) entre otras.

La coproducción deliberada y controlada se plantea en el Problema de Programación del Lote Económico (*ELSP*). En este modelo la demanda es conocida y determinista, y se pretende balancear el equilibrio entre los costes de almacenamiento y *setup* (Bomberger, 1966; Delporte y Thomas, 1977; Doll y Whybark, 1973; Elmaghraby, 1978). Por lo tanto, este problema queda definido como un sistema productivo en un entorno *ELSP* en el que dos productos se pueden coproducir o no en el equipo en un momento dado, conociendo sus parámetros asociados (*DCC-ELSP*).

Capítulo 4

DCC-ELSP para Dos Productos

4.1 Introducción

Una vez revisada la literatura relacionada con el problema *DCC-ELSP*, y constatado que no existe ninguna referencia que lo aborde del modo planteado en esta tesis, se decide que se debe comenzar a establecer las primeras afirmaciones sobre el problema.

El primer planteamiento que se desarrolla en este capítulo busca una resolución analítica del problema *DCC-ELSP*. Para ello, se considera apropiado comenzar por la coproducción deliberada y controlada de dos productos *a* y *b*, *DCC-ELSP-2P* en un entorno aislado. Se quiere plantear si realmente es posible una resolución analítica que soporte toda la complejidad del problema. En caso de que sea posible, se planteará el algoritmo que permita modelar el sistema.

4.2 Modelo

En la literatura se encuentran diferentes aproximaciones para resolver el problema *ELSP* basadas en diferentes métodos, como se han descrito en el capítulo anterior. (Bomberger, 1966; Hanssmann, 1962; Madigan, 1968; Maxwell, 1964). Las anteriores aproximaciones del *ELSP* se basan, la mayor parte de ellas, en el cálculo de un periodo óptimo para los productos a fabricar. Dicho periodo óptimo es calculado mediante fórmulas similares o derivadas de las clásicas del *EOQ* (Harris, 1913).

El modelo descrito a continuación pretende definir los periodos de lote óptimos para la coproducción controlada y deliberada, del mismo modo, que (Oner y Bilgic,

2008) lo hace para coproducción no controlada. El modelo pretende minimizar los costes totales para dos productos que se fabrican en una misma máquina, pudiéndose producirse con o sin coproducción. El objetivo es encontrar la forma más barata de obtener esos dos productos, que llamaremos *a* y *b*, los cuáles no son subproductos o *byproducts*, y su demanda no es sustituible.

4.2.1 Supuestos básicos y notación

Se consideran las siguientes suposiciones en el desarrollo del modelo:

- La tasa de demanda de cada producto es conocida y finita
- Los retrasos no están permitidos
- El horizonte de planificación se supone infinito
- Uno o dos productos se pueden producir en la máquina al mismo tiempo
- Una vez se ha producido unidad de un producto está inmediatamente disponible para satisfacer la demanda
- La tasa de producción y la tasa de coproducción de cada producto son deterministas, constantes y conocidas
- El tiempo de *setup* es independiente de la secuencia, tanto para la producción como para la coproducción
- El coste de almacenamiento de cada producto es constante
- La capacidad disponible en el sistema permite satisfacer la demanda
- Al final del periodo óptimo, el inventario de ambos productos es cero

La notación empleada en este capítulo es la que se muestra en la siguiente Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Parámetros y variables de decisión

Símbolo	Definición
d_a, d_b	Ratio de demanda del producto a or b (unidades por unidades de tiempo)
p_a, p_b	Ratio de producción del producto a or b (unidades por unidades de tiempo)
p_{ab}, p_{ba}	Ratio de coproducción del producto a en coproducción $a+b$, y b en coproducción $a+b$ (unidades por unidades de tiempo)
A_a, A_b	Coste de preparación de máquina para la producción del producto a or b (unidades de tiempo)
A_{ab}	Coste de preparación de máquina para la coproducción del producto $a+b$ (unidades de tiempo)
h_a, h_b	Coste de almacenamiento para producto a y el b (unidades por unidades de tiempo)
Q_a	Cantidad de a fabricada aisladamente (unidades)
Q_{ab}, Q_{ba}	Cantidad de a fabricada con coproducción $a+b$, y cantidad de b fabricada con coproducción $a+b$ (unidades)
I_a, I_b	Inventario promedio del producto a y b (unidades)
T	Tiempo de Ciclo (unidades de tiempo)
CT	Coste total (unidades monetarias)
τ	Velocidad relativa de consumo de lo fabricado bajo coproducción, $\tau = \frac{p_{ab} d_b}{p_{ba} d_a}$

4.2.2 Desarrollo del modelo

El objetivo es determinar cómo producir de manera más barata los productos a y b estando disponible la opción de producirlos aisladamente o coproducirlos, y conociendo en cualquier caso los parámetros asociados al proceso (coproducción controlada y deliberada-DCC-ELSP). Sin pérdida de generalidad, se establece como producto a aquel producto cuya pendiente relativa de consumo en coproducción es mayor. Así se cumple (4.1):

$$\frac{d_a}{p_{ab}} > \frac{d_b}{p_{ba}} \tag{4.1}$$

El caso en el que entre los ratios se diera la igualdad estricta no se desarrolla por su obviedad. Esta opción resultará más barata que la producción de cada uno de los productos de manera aislada (a y b) en función sólo de las parámetros asociados al *setup* de coproducción (tiempo y coste). Así, respetando la relación (4.1) aparecen las siguientes opciones productivas:

1. producir a y b y nunca producir $a+b$
2. producir a , b y $a+b$
3. producir a y $a+b$

Interesa destacar cómo entre las opciones productivas no se incluye el caso de producir b y $a+b$, por la propia definición de a y b (la demanda de a no podría ser cubierta).

El primer caso de la lista, esto es, producir a y b de manera aislada, no se corresponde con ninguna opción de coproducción y es simplemente el problema *ELSP* tradicional. La cota inferior para este problema tal y como se ha desarrollado en el estado del arte se llama Solución Independiente y se va a denotar como LB_{ELSP} . Esta cota se calcula como (3.6):

$$LB_{ELSP} = \sqrt{2A_a h_a d_a \left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right)} + \sqrt{2A_b h_b d_b \left(1 - \frac{d_b}{p_b}\right)} \quad (4.2)$$

El segundo caso de la lista, esto es, fabricar el producto a y b de manera aislada y coproducir $a+b$, como se podría intuir y se muestra en (Vidal-Carreras et al., 2008c) no es mejor que producir de manera aislada a y coproducir $a+b$. Así, las opciones relativas a la coproducción se reducen al tercer caso de la lista. Por tanto, un modo de evaluar el modo más barato de producir los productos a y b en un ambiente de coproducción controlada y deliberada es el siguiente: comparar los costes mínimos asociados a la opción de producir de manera aislada (IS), frente al mejor modo de coproducir a y b , que se ha deducido que consistirá en fabricar a y $a+b$ con coproducción.

Representar la cota inferior de esta opción de coproducción (a , $a+b$) es complejo. En (Vidal-Carreras et al., 2008c), se plantea esta cota como solución del siguiente problema no lineal (4.3), que pretende obtener las variables $(T_a, T_b, T_{ab} = T_{ba}, q_a, q_b, q_{ab}, q_{ba})$:

$$\text{Minimize } CT = \text{Minimize} \left\{ \begin{array}{l} \frac{T_a}{2} q_a h_a \left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + \frac{H}{T_a} A_a + \frac{T_b}{2} q_b h_b \left(1 - \frac{d_b}{p_b}\right) + \frac{H}{T_b} A_b + \\ + \frac{T_{ab}}{2} \left[q_{ab} h_a \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + q_{ba} h_b \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) \right] + \frac{H}{T_{ab}} (A_{ab} + A_{ba}) \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

subject to;

$$d_a = q_a + q_{ab}, \quad d_b = q_b + q_{ba}, \quad q_{ab} = q_{ba} \left(\frac{p_{ab}}{p_{ba}} \right)$$

T_a, T_b, T_{ab} : Tiempo de Ciclo (unidades de tiempo) o unidades de tiempo entre la producción de dos productos a o b , de manera consecutiva o de una coproducción $a+b$.

q_a, q_b : Parte de la demanda del producto a o b producida de manera independiente.

q_{ab}, q_{ba} : Parte de la demanda del producto a producida junto con b en coproducción, o viceversa.

H : Horizonte.

Sin embargo, en dicho trabajo se muestra que debido a la complejidad de su resolución analítica, el sistema no obtiene un resultado sin límite de iteraciones.

En esta tesis se aborda la resolución del problema mediante una ligera simplificación, que posteriormente se muestra robusta y más inteligible. Se pretende definir un tiempo de ciclo T en que se lanza la producción de a , n veces y m veces la coproducción de $a+b$. Al final del ciclo el inventario de a y de b debe ser nulo, para comenzar el nuevo ciclo con la coproducción $a+b$. Se plantea el modelo de costes totales en función del tiempo de ciclo T , el número de veces n que se lanzará la fabricación del producto a y el número de veces m que se coproducirá $a+b$. Los costes totales son función del coste del número de *setups* realizados y del coste de almacenamiento de los productos dentro del ciclo T (4.4).

$$CT(T, m, n) = \frac{1}{T}(mA_{ab} + nA_a) + h_a I_a + h_b I_b \quad (4.4)$$

La fórmula de los costes totales es función de T , n y m , pues los inventarios promedios de los productos a y b (I_a, I_b) son función de T , n y m como se desarrolla en el apartado inmediatamente posterior. Para calcular el valor de estos inventarios promedios es necesario calcular los valores Q_a, Q_{ba}, Q_{ab} . La demanda total del productos a se satisface al lanzar n runs de producto a de un tamaño Q_a y m runs de coproducción $a+b$, Q_{ab} , dentro del tiempo de ciclo T (4.5). La demanda total del producto b se debe satisfacer al lanzar m runs de coproducción $a+b$, Q_{ba} , dentro del tiempo de ciclo T (4.6). La relación (4.7) se deriva al tratarse de una coproducción controlada en la que los ratios de coproducción son conocidos.

$$nQ_a + mQ_{ab} = d_a T \quad (4.5)$$

$$mQ_{ba} = d_b T \quad (4.6)$$

$$\frac{Q_{ab}}{P_{ab}} = \frac{Q_{ba}}{P_{ba}} \quad (4.7)$$

De esta manera, es posible despejar los tamaños de lote en función de los parámetros del modelo y del tiempo de ciclo, como se muestra en (4.8), (4.9) y (4.10).

$$Q_{ba} = \frac{d_b T}{m} \quad (4.8)$$

$$Q_{ab} = \frac{p_{ab}}{p_{ba}} Q_{ba} = \frac{p_{ab}}{p_{ba}} \frac{d_b T}{m} = \tau \frac{d_a T}{m} \quad (4.9)$$

$$Q_a = \frac{d_a T - mQ_{ab}}{n} = \frac{1-\tau}{n} d_a T \quad (4.10)$$

La función (4.4) depende de tres variables: n, m, T . Para poder realizar la optimización multivariable se limitan las variables n y m , fijando el valor de alguna de ellas de acuerdo con (4.11). La bondad de esta estrategia de resolución se comprueba a partir de los resultados obtenidos como se muestra en la apartado 4.3.

$$(n=1) \vee (m=1) \tag{4.11}$$

Por lo tanto, aparecen dos casos de resolución. El caso $(n \geq 1, m = 1)$ que consiste en lanzar n runs del producto a , y un run de coproducción de $a+b$, hasta alcanzar el óptimo de T . El caso $(n = 1, m \geq 1)$ que consiste en lanzar un run de producto a y m runs de coproducción $a+b$ hasta alcanzar el óptimo de T , que ocurre cuando los inventarios de los dos productos llegan a cero. El modo de cálculo de los tamaños de ciclo T para cada una de las opciones será diferente. El problema se bifurca en dos modelos para los dos casos diferentes, que deben coincidir cuando $n=1$ y $m=1$.

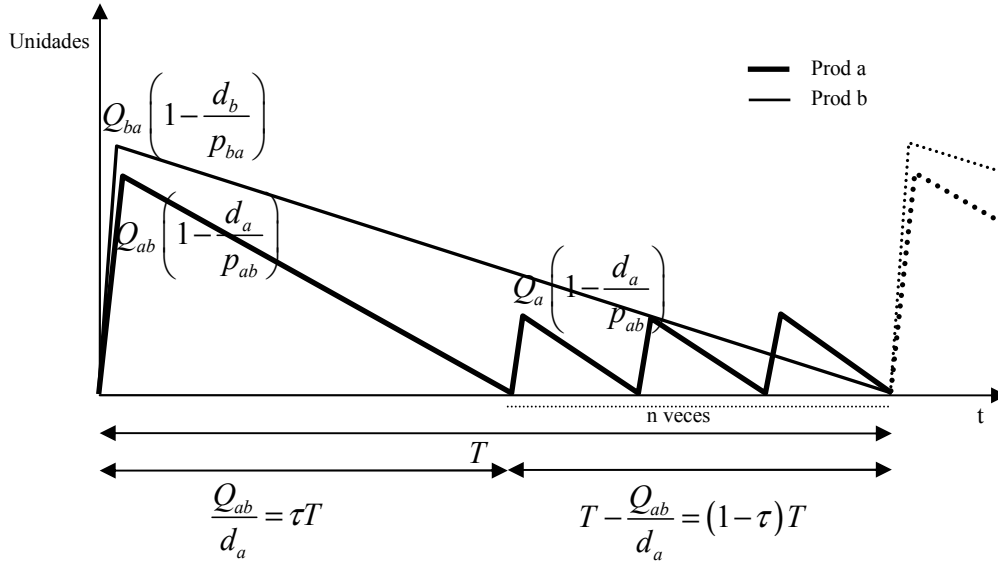
El valor de T que se obtenga de estos modelos será función de n o m según sea el caso. Así, será posible encontrar la combinación de T, n y m que suponga un coste menor. Este procedimiento se encuentra incluido en el algoritmo de optimización del punto 4.2.5, algoritmo *DCC-ELSP-2P*.

4.2.3 Caso $(n \geq 1, m = 1)$ n runs de producto a y un run de coproducción $a+b$

El modelo que se va a plantear en este apartado considera el lanzamiento dentro de un periodo T , de n runs del producto a , con tamaño Q_a , y un run de coproducción de $a+b$, con las cantidades Q_{ab} para a y Q_{ba} para b . En la Figura 4.1 se muestra esquemáticamente la evolución en el tiempo de los inventarios para el caso. La dinámica que sigue la política representada consiste en lanzar inicialmente la coproducción de $a+b$. Debido a las cantidades de producto fabricadas, y a que la pendiente de consumo relativo en coproducción de a es mayor que la de b , es necesario el lanzamiento de n lotes del producto a de tamaño Q_a hasta que se alcance el óptimo del ciclo.

Para esta situación $(n \geq 1, m = 1)$ se desarrolla el modo del cálculo de los inventarios medios. El inventario medio del producto b se calcula como:

$$I_b = \frac{Q_{ba}}{2} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}} \right) = \frac{d_b T}{2} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}} \right) \tag{4.12}$$


 Figura 4.1 Gráfico de inventario-tiempo para el caso ($n \geq 1, m = 1$)

El inventario medio del producto a se calcula como:

$$\begin{aligned}
 I'_a &= \frac{1}{T} \left[\frac{Q_{ab}}{d_a} \frac{Q_{ab}}{2} + \left(T - \frac{Q_{ab}}{d_a} \right) \frac{Q_a}{2} \right] = \frac{1}{T} \left[\tau T \frac{\tau d_a T}{2} + (1 - \tau) T \frac{1 - \tau}{2n} d_a T \right] = \\
 &= \frac{d_a T}{2} \left(\tau^2 + \frac{(1 - \tau)^2}{n} \right)
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned}
 I_a &= I'_a + I_{ab} = \frac{1}{T} \left(\frac{Q_{ab}}{d_a} \frac{Q_{ab}}{2} \right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}} \right) + \frac{1}{T} \left[\left(T - \frac{Q_{ab}}{d_a} \right) \frac{Q_a}{2} \right] \left(1 - \frac{d_a}{p_a} \right) = \\
 &= \frac{1}{T} \left[\tau T \frac{\tau d_a T}{2} \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}} \right) + (1 - \tau) T \frac{1 - \tau}{2n} d_a T \left(1 - \frac{d_a}{p_a} \right) \right] = \\
 &= \frac{d_a T}{2} \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}} \right) + \frac{(1 - \tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_a}{p_a} \right) \right]
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Con todo eso, resultan los siguientes inventarios medios (4.15) y (4.16).

$$I_a = \frac{d_a T}{2} \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}} \right) + \frac{(1 - \tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_a}{p_a} \right) \right] \tag{4.15}$$

$$I_b = \frac{d_b T}{2} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}} \right) \tag{4.16}$$

Los costes totales son calculados en función del tiempo de ciclo T y el número de veces n que se lanzarán lotes del producto a . Sustituyendo (4.15) y (4.16) en (4.4) con $m=1$ se obtiene la función de costes totales (4.17).

$$CT(T, n) = \left[\begin{array}{l} \frac{1}{T}(A_{ab} + nA_a) + h_b \left[\frac{d_b T}{2} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}} \right) \right] \\ + h_a \left[\frac{d_a T}{2} \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}} \right) + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_a}{p_a} \right) \right] \right] \end{array} \right] \quad (4.17)$$

El objetivo es determinar el ciclo óptimo y el número de lanzamientos n del producto a de forma individual, con el fin de minimizar los costes totales como se muestra en la expresión (4.18).

$$CT(T^*, n) = \min_{T, n > 0} \{CT(T, n)\} \quad (4.18)$$

En el Teorema 1, se muestra la ecuación para calcular el ciclo óptimo, con el que se determina el mínimo global de la función de costes en función de n . Donde n es un número entero no derivable.

Teorema 1: El tiempo de ciclo para el caso donde $n \geq 1$ y $m=1$, que minimiza los costes totales se calcula como:

$$T^* = \sqrt{\frac{2(A_{ab} + nA_a)}{h_b d_b \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}} \right) + h_a d_a \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}} \right) + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_a}{p_a} \right) \right]}} \quad (4.19)$$

Prueba. La función de costes totales viene dado por:

$$CT = \frac{1}{T}(A_{ab} + nA_a) + h_b \frac{d_b T}{2} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}} \right) + h_a \frac{d_a T}{2} \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}} \right) + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_a}{p_a} \right) \right] \quad (4.20)$$

La primera derivada resulta en:

$$\frac{\partial}{\partial T} \left\{ \frac{1}{T}(A_{ab} + nA_a) + h_b \frac{d_b T}{2} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}} \right) + h_a \frac{d_a T}{2} \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}} \right) + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_a}{p_a} \right) \right] \right\} = 0 \quad (4.21)$$

$$\frac{-(A_{ab} + nA_a)}{T^2} + \frac{h_b d_b}{2} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}} \right) + \frac{h_a d_a}{2} \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}} \right) + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_a}{p_a} \right) \right] = 0 \quad (4.22)$$

Mediante manipulaciones algebraicas se obtiene el tiempo de ciclo en función del parámetro n :

$$T^* = \sqrt{\frac{2(A_{ab} + nA_a)}{h_b d_b \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) + h_a d_a \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right)\right]}} \quad (4.23)$$

Para demostrar que T^* es el mínimo global del problema, se comprueba la segunda derivada.

$$\frac{\partial^2 CT(T, n)}{\partial T^2} = \frac{2(nA_a + A_{ab})}{T^3} \geq 0 \quad (4.24)$$

Como la segunda derivada es no negativa para todo a, b y n , $CT(T, n)$ es convexa y por lo tanto el punto estacionario de la función es en efecto, el óptimo global. Para que T^* esté bien definida, el denominador de la ecuación (3.5) para $n \geq 1$ debe ser no negativo. A través de manipulaciones algebraicas se obtiene que el denominador de T^* como:

$$h_b d_b \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) + h_a d_a \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right)\right] > 0 \quad (4.25)$$

Es claro que τ no es negativo. Los factores $\left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right)$, $\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right)$, $\left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right)$ son < 1 por la suposición 9 del apartado 4.1.

4.2.4 Caso ($n=1, m \geq 1$) un run del producto a y m runs de coproducción $a+b$

El modelo que se va a plantear en este apartado considera el lanzamiento dentro de un periodo T , de un *run* de producto a de tamaño Q_a , y de m *runs* de coproducción de $a+b$, con la cantidad Q_{ab} para a y Q_{ba} para b . En la Figura 4.2 se muestra esquemáticamente la evolución en el tiempo de los inventarios para el caso. La dinámica que sigue la política representada consiste en lanzar inicialmente un lote de $a+b$ con coproducción. En este caso, es necesario el lanzamiento de un lote del producto a de tamaño Q_a . Además para alcanzar el óptimo del ciclo es necesario lanzar de $m-1$ coproducciones más de $a+b$.

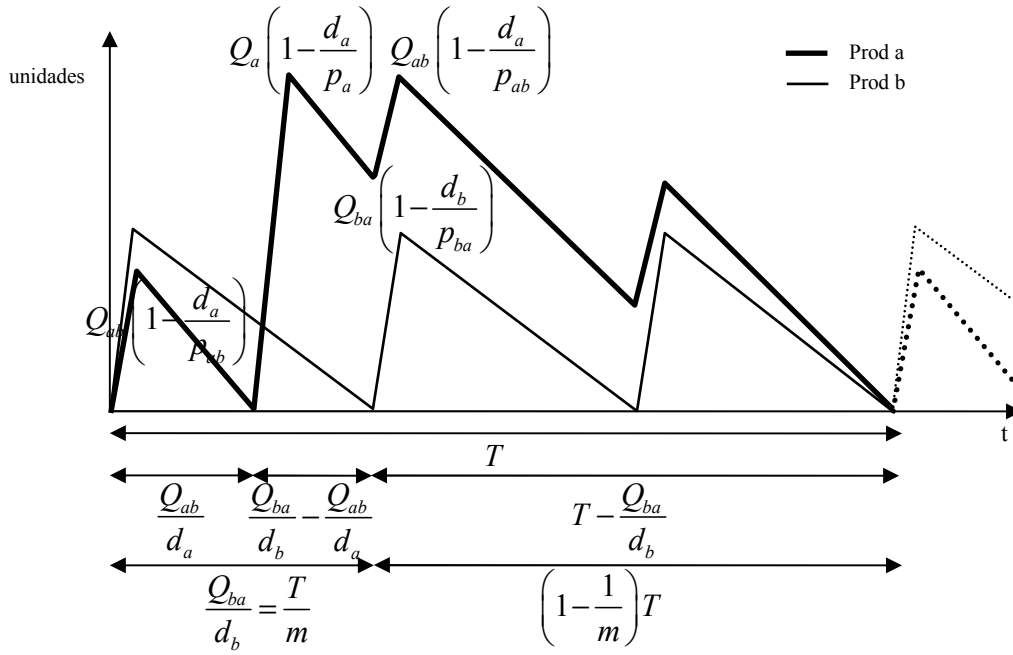


Figura 4.2 Gráfico de inventario-tiempo para el caso $(n = 1, m \geq 1)$

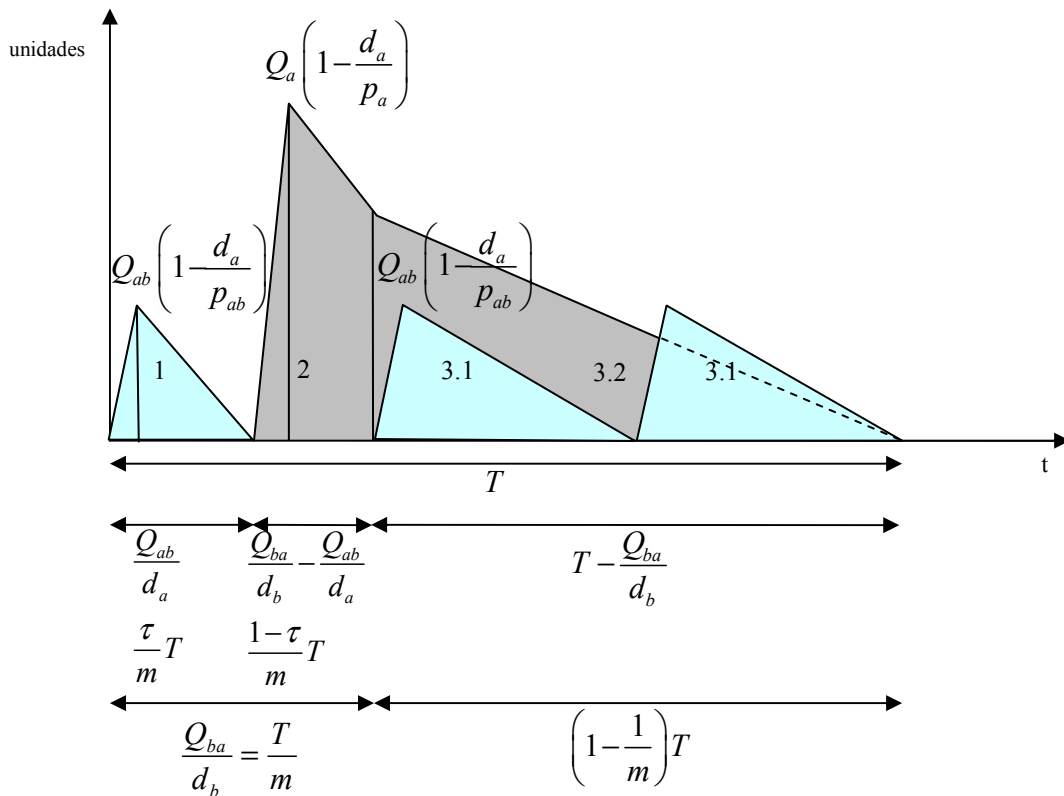


Figura 4.3 Secciones para el cálculo del inventario medio para el caso $(n = 1, m \geq 1)$

Para esta situación ($n=1, m \geq 1$) se desarrolla el modo del cálculo de los inventarios medios. El inventario medio del producto b (Figura 4.2) se calcula como:

$$I_b = \frac{Q_{ba}}{2} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) = \frac{d_b T}{2m} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) \quad (4.26)$$

Calcular el inventario medio del producto a es más complejo. Para ello se emplea la Figura 4.3. Así, a partir de la observación de la Figura 4.3 se derivan las siguientes fórmulas.

$$I_{a3} = I_{a31} + I_{a32} \quad (4.27)$$

$$\begin{aligned} I_{a31} &= \frac{1}{T} \left[\left(1 - \frac{1}{m}\right) T \frac{Q_{ab}}{2} \right] \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) = \frac{1}{T} \left[\left(1 - \frac{1}{m}\right) T \frac{\tau}{2m} d_a T \right] \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) = \\ &= \frac{\tau d_a T}{2m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned} I_{a32} &= \frac{1}{T} \left[\frac{Q_a - d_a \left(\frac{Q_{ba}}{d_b} - \frac{Q_{ab}}{d_a}\right)}{2} \left(1 - \frac{1}{m}\right) T \right] = \\ &= \frac{1}{T} \left[\frac{(1-\tau) d_a T - d_a T \left(\frac{1-\tau}{m}\right)}{2} \left(1 - \frac{1}{m}\right) T \right] = \frac{d_a T}{2} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left[(1-\tau) - \left(\frac{1-\tau}{m}\right) \right] = \\ &= \frac{d_a T}{2} (1-\tau) \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$I_{a3} = \frac{\tau d_a T}{2m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{d_a T}{2} \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) \quad (4.30)$$

$$\begin{aligned} I_{a2} &= \frac{1}{T} \left[\frac{Q_a \left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + Q_a - d_a \left(\frac{Q_{ba}}{d_b} - \frac{Q_{ab}}{d_a}\right)}{2} \right] \left(\frac{Q_{ba}}{d_b} - \frac{Q_{ab}}{d_a}\right) = \\ &= \frac{1}{T} \left[\frac{(1-\tau) d_a T \left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + (1-\tau) d_a T - d_a T \left(\frac{1-\tau}{m}\right)}{2} \right] \left(T \frac{1-\tau}{m}\right) = \\ &= \frac{(1-\tau)^2 d_a T}{2m} \left[\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a3} \quad (4.32)$$

Con todo esto, el inventario medio del producto a se calcula como:

$$I_a = \frac{\tau^2 d_a T}{2m^2} \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2 d_a T}{2m} \left[\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] + \frac{\tau d_a T}{2m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{d_a T}{2} \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) \quad (4.33)$$

Así, resultan los siguientes niveles de inventarios medios (4.34) y (4.35).

$$I_a = \left[\begin{array}{l} \frac{\tau^2 d_a T}{2m^2} \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2 d_a T}{2m} \left[\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] \\ + \frac{\tau d_a T}{2m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{d_a T}{2} \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) \end{array} \right] \quad (4.34)$$

$$I_b = \frac{d_b T}{2m} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) \quad (4.35)$$

Los costes totales son determinados en función del tiempo de ciclo T y el número de veces m que se lanzarán los lotes con la coproducción de los productos a y b . Sustituyendo (4.34) y (4.35) en (4.4) con $n=1$, se obtiene la función de costes totales en (4.36).

$$CT(T, m) = \left[\begin{array}{l} \frac{1}{T} (mA_{ab} + A_a) + h_b \frac{d_b T}{2m} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) \\ + h_a \left[\frac{\tau^2 d_a T}{2m^2} \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2 d_a T}{2m} \left[\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] \right. \\ \left. + \frac{\tau d_a T}{2m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{d_a T}{2} \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) \right] \end{array} \right] \quad (4.36)$$

El objetivo es determinar el ciclo óptimo y el número de lanzamientos del producto a de forma individual, con el fin de minimizar de costes promedios en la función (4.37) donde T^* y m , son el tiempo de ciclo óptimo y el número de lanzamientos de $a+b$, respectivamente.

$$CT(T^*, m) = \min_{T, m > 0} \{CT(T, m)\} \quad (4.37)$$

En el Teorema 2, se obtiene el ciclo óptimo que minimiza la función de costes (4.38) en función del parámetro de control m , cuyo valor es entero y no derivable.

Teorema 2: El tiempo de ciclo para el caso donde $n=1$ y $m \geq 1$, que minimiza los costes totales se calcula como:

$$T^* = \sqrt{\frac{2(mA_{ab} + A_a)}{\frac{h_b d_b}{m} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) + h_a d_a \left[\frac{\tau^2}{m^2} \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2}{m} \left[\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] + \frac{\tau}{m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) \right]}} \quad (4.38)$$

Prueba. La función de costes totales viene dado por:

$$CT = \frac{1}{T} (mA_{ab} + A_a) + h_b \frac{d_b T}{2m} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) + h_a \left[\frac{\tau^2 d_a T}{2m^2} \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2 d_a T}{2m} \left[\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] + \frac{\tau d_a T}{2m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{d_a T}{2} \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) \right] \quad (4.39)$$

La primera derivada resulta en:

$$\frac{\partial C}{\partial T} = 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \left\{ (mA_{ab} + A_a) + h_b \frac{d_b T}{2m} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) + h_a \left[\frac{\tau^2 d_a T}{2m^2} \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2 d_a T}{2m} \left[\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] + \frac{\tau d_a T}{2m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{d_a T}{2} \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) \right] \right\} \quad (4.40)$$

$$\frac{-(mA_{ab} + A_a)}{T^2} + \frac{h_b d_b}{2m} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) + \frac{h_a d_a}{2} \left[\frac{\tau^2}{m^2} \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2}{m} \left[\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] + \frac{\tau}{m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) \right] = 0 \quad (4.41)$$

Mediante manipulaciones algebraicas se obtiene el tiempo de ciclo en función del parámetro m :

$$T^* = \sqrt{\frac{2(mA_{ab} + A_a)}{\frac{h_b d_b}{m} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) + h_a d_a \left[\frac{\tau^2}{m^2} \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2}{m} \left[\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] + \frac{\tau}{m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) \right]}} \quad (4.42)$$

Para demostrar que T^* es el mínimo global del problema se comprueba la segunda derivada.

$$\frac{\partial^2 CT(T, m)}{\partial T^2} = \frac{2(mA_a + A_{ab})}{T^3} \geq 0 \quad (4.43)$$

Como la segunda derivada es no negativa para todo a , b y m , $CT(T, m)$ es convexa, y el punto estacionario de la función es en efecto el óptimo global. Para que T^* esté bien definida, el denominador de la ecuación (4.42) para $m \geq 1$ debe ser no negativo. A través de manipulaciones algebraicas se obtiene que el denominador de T^* como:

$$\frac{h_b d_b}{m} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) + h_a d_a \left[\frac{\tau^2}{m^2} \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2}{m} \left[\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] + \frac{\tau}{m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) \right] > 0 \quad (4.44)$$

Es claro que τ no es negativo. Los factores $\left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right)$, $\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right)$, $\left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right)$ son < 1 por la suposición 9 del apartado 4.1.

Para comprobar que se ha obtenido un resultado válido se considera adecuado comprobar que cuando $m=1$ y $n=1$, en la fórmula (4.19) como en la fórmula (4.38) se obtiene el mismo resultado.

Si se considera el valor de T^* óptimo para cada caso de acuerdo con:

$$T_1^* = T^*(n=1, m=1) \text{ con } T^* \text{ calculado de acuerdo con (4.19), caso } (n \geq 1, m=1)$$

$$T_2^* = T^*(n=1, m=1) \text{ con } T^* \text{ calculado de acuerdo con (4.38), caso } (n=1, m \geq 1)$$

Se obtiene (4.45) y (4.46):

$$T_1^* = \sqrt{\frac{2(mA_{ab} + A_a)}{\frac{h_b d_b}{m} \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) + h_a d_a \left[\frac{\tau^2}{m^2} \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2}{m} \left[\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] + \frac{\tau}{m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) \right]}} \quad (4.45)$$

$$T_2^* = \sqrt{\frac{2(A_{ab} + nA_a)}{h_b d_b \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) + h_a d_a \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) \right]}} \quad (4.46)$$

Después de manipulaciones algebraicas se obtiene el mismo valor del tiempo de ciclo para ambas ramas, esto es, $T_1^* = T_2^*$:

$$T_1^* = \sqrt{\frac{2(A_{ab} + A_a)}{h_b d_b \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) + h_a d_a \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + (1-\tau)^2 \left[\left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) \right] \right]}} \quad (4.47)$$

$$T_2^* = \sqrt{\frac{2(A_{ab} + A_a)}{h_b d_b \left(1 - \frac{d_b}{p_{ba}}\right) + h_a d_a \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_{ab}}\right) + (1-\tau)^2 \left(1 - \frac{d_a}{p_a}\right) \right]}} \quad (4.48)$$

4.2.5 Algoritmo de resolución del modelo: Algoritmo DCC-ELSP-2P

Este algoritmo de resolución (Algoritmo 1) denominado Algoritmo DCC-ELSP-2P (*Deliberate Controlled Coproduction - Economic Lot Scheduling Problem- 2 Products*) permite obtener el modo más barato de realizar la producción de los dos productos a y b , deliberando el uso de la coproducción. Se obtiene como resultado la opción más económica, con sus parámetros asociados. Es decir, si es más barato no coproducir devuelve el tamaño de ciclo del ELSP tradicional T_i . Si la

coproducción es lo más económico, nos devuelve el valor de T^*, n, m a partir del cual se deriva Q_a, Q_{ab}, Q_{ba} con las fórmulas apropiadas según el caso ($n \geq 1, m = 1$) o ($n = 1, m \geq 1$).

Algoritmo 1. Algoritmo DCC-ELSP-2P

DATOS: Todos los parámetros

- 1: $CotaInferior_{ELSP}$
- 2: $i = 0$
- 3: $CT_{MIN} \leftarrow CT(T^*, n = 1, m = 1)$
- 4: *Do*
- 5: $i ++$
- 6: $CT \leftarrow CT_n(T^*, n = 1, m = 1 + i)$
- 7: *if* ($CT_n < CT_{MIN}$) { $CT_{MIN} \leftarrow CT$ }
- 8: $CT \leftarrow CT_m(T^*, n = 1 + i, m = 1)$
- 9: *if* ($CT_m < CT_{MIN}$) { $CT_{MIN} \leftarrow CT$ }
- 10: *While* ($CT < CT_{MIN}$)
- 11: *if* ($CT_{min} < CotaInferior_{ELSP}$)
- 12: *Return* { $CT_{MIN}, T^*, n, m \rightarrow Q_a, Q_{ab}$ and Q_{ba} }
- 13: *Else* { *Return* $CotaInferior_{ELSP} \rightarrow Q_a$ and Q_b }

Inicialmente el bucle que define n y m recorría todo el espacio, eligiendo la combinación (n, m) que generaba menor coste. El análisis de los resultados presentados en el apartado siguiente, nos permite diseñar el algoritmo anterior, que es mucho más eficiente.

4.3 Ilustración Numérica

Para facilitar la comprensión del algoritmo y el análisis de las fórmulas obtenidas, se considera adecuado plantear una serie de ejemplos numéricos (Tabla 4.2). Estos ejemplos permiten a su vez analizar si en esas situaciones interesa o no la coproducción desde el punto de vista de costes.

Se supone que dos productos a y b se fabrican en una instalación única. Los datos relevantes se plantean en la Tabla 4.2, cumpliendo los supuestos y la condición que se muestra en la ecuación (4.1). Se plantean diez casos. Para cada uno de los casos se muestran distintos escenarios de utilización de la máquina, concretamente alto, medio y bajo grado de utilización (Oner y Bilgic, 2008). La utilización del sistema depende del ratio d_i/p_i . El objetivo es determinar si es más barato fabricarlos de manera independiente o utilizando coproducción.

En los diez casos planteados la tasa de coproducción para cada producto es la mitad de la tasa de producción independiente. Para los casos del 1 al 6, se asume que el coste de *setup* cuando hay coproducción es el máximo de los costes de *setup* de cada producto fabricado de manera aislada. En el caso 7 y 8, los costes de *setup* cuando hay coproducción son la suma de los costes de *setup* de cada producto fabricado de manera aislada, y en el caso 9 y 10 son el promedio.

En los casos 1 y 2, la relación entre el coste de preparación de máquina y el coste de almacenamiento es igual para cada producto. En el caso 1, los costes de almacenamiento y *setup* del producto *a* son mayores que los de *b*, y en el caso 2 ocurre lo contrario. Los casos 3 y 4 plantean la situación cuando los dos productos tienen las mismas tasas de producción, los mismos costes de almacenamiento y *setup*, pero las demandas diferentes. Concretamente en el caso 3 la demanda de *b* es mucho menor que la de *a*, y en el caso 4 solo ligeramente menor. En los casos 5 y 6, el coste del *setup* de un producto es mucho más pequeño que el otro. Concretamente en el caso 5, el *setup* individual de *a* es mucho mayor que el de *b*. En el caso 6 ocurre lo contrario. En los casos 7 y 8, los costes de *setup* de coproducción son la suma de los costes de *setup* individuales. Además, en el caso 7 el coste de *setup* individual de *a* es mayor que el de *b*. En el caso 8 ocurre lo contrario. Por último, en los casos 9 y 10, los costes de *setup* de coproducción son el promedio de los costes de *setup* individuales. Además, en el caso 9 el coste de *setup* individual de *a* es mayor que el de *b*. En el caso 10 ocurre lo contrario.

Tabla 4.2 Datos para conocer el efecto de la utilización de la instalación

Caso	Ratio		di	pi	pij	hi	Ai	Aij
	Utilización	Prod						
1	bajo	a	70	400	200	10	100	100
		b	10	100	50	6	60	100
	medio	a	70	200	100	10	100	100
		b	10	70	35	6	60	100
	alto	a	70	150	75	10	100	100
		b	10	50	25	6	60	100
2	bajo	a	70	400	200	6	60	100
		b	10	100	50	10	100	100
	medio	a	70	200	100	6	60	100
		b	10	70	35	10	100	100
	alto	a	70	150	75	6	60	100
		b	10	50	25	10	100	100
3	bajo	a	70	400	200	6	100	100
		b	10	400	200	6	100	100
	medio	a	70	200	100	6	100	100
		b	10	200	100	6	100	100
	alto	a	70	150	75	6	100	100
		b	10	150	75	6	100	100
4	bajo	a	70	400	200	6	100	100
		b	60	400	200	6	100	100
	medio	a	70	200	100	6	100	100
		b	60	200	100	6	100	100
	alto	a	70	150	75	6	100	100
		b	60	150	75	6	100	100
5	bajo	a	70	400	200	6	10	100
		b	10	100	50	6	100	100
	medio	a	70	200	100	6	10	100
		b	10	70	35	6	100	100
	alto	a	70	150	75	6	10	100
		b	10	50	25	6	100	100
6	bajo	a	70	400	200	6	100	100
		b	10	100	50	6	10	100
	medio	a	70	200	100	6	100	100
		b	10	70	35	6	10	100
	alto	a	70	150	75	6	100	100
		b	10	50	25	6	10	100
7	bajo	a	70	400	200	20	60	160
		b	10	100	50	6	100	160
	medio	a	70	200	100	20	60	160
		b	10	70	35	6	100	160
	alto	a	70	150	75	20	60	160
		b	10	50	25	6	100	160
8	bajo	a	70	400	200	6	100	160
		b	10	100	50	20	60	160
	medio	a	70	200	100	6	100	160
		b	10	70	35	20	60	160
	alto	a	70	150	75	6	100	160
		b	10	50	25	20	60	160
9	bajo	a	70	400	200	10	100	80
		b	10	100	50	6	60	80
	medio	a	70	200	100	10	100	80
		b	10	70	35	6	60	80
	alto	a	70	150	75	10	100	80
		b	10	50	25	6	60	80
10	bajo	a	70	400	200	6	60	80
		b	10	100	50	10	100	80
	medio	a	70	200	100	6	60	80
		b	10	70	35	10	100	80
	alto	a	70	150	75	6	60	80
		b	10	50	25	10	100	80

Para estas situaciones los valores obtenidos con el algoritmo *DCC-ELSP-2P* se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Resultados del Algoritmo *DCC-ELSP-2P*

Caso	Ratio Utilización	Cota Inferior	CostesMinCop	Cop	T	n	m	ΔCostes
1	bajo	420,35	347,93	S	1,15	1	1	0,1723
	medio	380,22	307,44	S	1,95	2	1	0,1914
	alto	349,15	251,62	S	2,38	2	1	0,2793
2	bajo	338,08	272,93	S	1,17	1	1	0,1927
	medio	311,93	245,3	S	1,3	1	1	0,2136
	alto	290,44	210,36	S	1,52	1	1	0,2757
3	bajo	371,42	337,51	S	1,78	2	1	0,0913
	medio	340,44	306,78	S	1,96	2	1	0,0989
	alto	317,49	284,45	S	2,11	2	1	0,1041
4	bajo	510,64	389,06	S	2,06	1	3	0,2381
	medio	458,17	291,96	S	2,06	1	2	0,3628
	alto	419,51	197,12	S	2,03	1	1	0,5301
5	bajo	187,17	210,17	N	-	-	-	-0,1229
	medio	175,31	187,31	N	-	-	-	-0,0684
	alto	164,91	158,56	S	1,39	1	1	0,0385
6	bajo	296,11	283,4	S	1,41	1	1	0,0429
	medio	265,74	252,56	S	1,58	1	1	0,0496
	alto	242,64	213,81	S	1,87	1	1	0,1188
7	bajo	476,21	495,18	N	-	-	-	-0,0398
	medio	431,87	435,77	N	-	-	-	-0,009
	alto	397,31	361,47	S	1,22	1	1	0,0902
8	bajo	410,22	403,3	S	1,29	1	1	0,0169
	medio	377,09	367,32	S	1,42	1	1	0,0259
	alto	350,22	321,11	S	1,62	1	1	0,0831
9	bajo	420,35	330,08	S	1,09	1	1	0,2148
	medio	380,22	286,21	S	1,82	2	1	0,2473
	alto	349,15	234,25	S	2,22	2	1	0,3291
10	bajo	338,08	255,3	S	1,1	1	1	0,2448
	medio	311,93	229,46	S	1,22	1	1	0,2644
	alto	290,44	196,77	S	1,42	1	1	0,3225

En la Figura 4.4 se muestran una serie de graficas de la evolución de los costes totales frente a los valores de n, m para ($n \geq 1, m = 1$) y ($n = 1, m \geq 1$). En cada una de las gráficas aparecen seis curvas para cada uno de los casos de la Tabla 4.2. Tres de ellas representan los costes de producir de forma independiente los productos calculados con (3.6) (Cota inferior) para cada uno de los 3 niveles de utilización de la máquina (bajo, medio, alto). Las otras tres curvas representan los costes de coproducción para cada uno de los 3 niveles de utilización de la máquina.

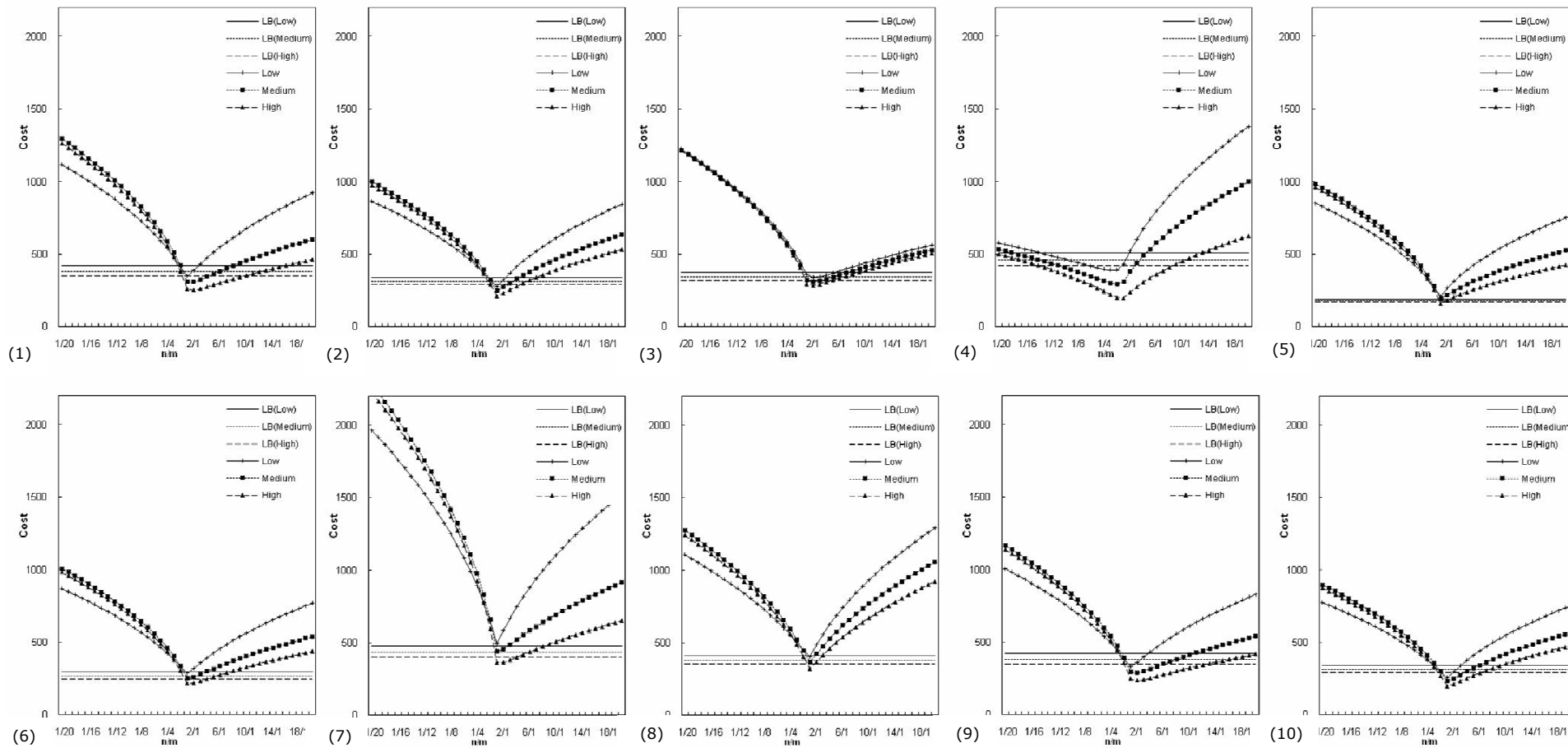


Figura 4.4 Evolución de costes de coproducción vs cota inferior

De la observación de la Tabla 4.3 y la Figura 4.4 se pueden derivar las siguientes observaciones globales:

- La coproducción puede resultar mucho más cara que la producción aislada si no se define adecuadamente.
- El ahorro en costes de una combinación de n y m , donde no se imponga $(n=1) \vee (m=1)$ no es significativo, puesto que en los casos en los que tendría sentido se intuye pequeño. Un modo de estimar la pérdida máxima por no haber considerado la combinación (n,m) general sin restricciones, es compensar la diferencia del óptimo contra los dos de al lado y dividirlo por el óptimo de acuerdo con la figura y fórmula siguientes:

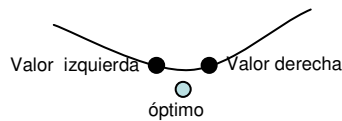


Figura 4.5 Estimación Pérdida Máxima

$$PérdidaMax = \frac{valor - \acute{o}ptimo}{valor} \quad (4.49)$$

Realmente esta sería una cota muy superior a la pérdida respecto del óptimo.

- Es mejor utilizar el algoritmo de optimización *DCC-ELSP-2P* planteado en 4.2.5 para que los cálculos se realicen de manera ordenada y no recorrer todo el espacio de soluciones, dado que converge rápidamente.
- A mayor utilización de la máquina el sistema tiende a hacer más favorable la coproducción, al igual que le ocurre a (Oner y Bilgic, 2008) aunque en su caso la coproducción no es deliberada.
- Un juego de datos que cumpla todas las hipótesis iniciales, no implica que la mejor opción sea optar por su coproducción. Por ello es importante la posibilidad de elección de la coproducción.

Además, en función de los casos podemos deducir las siguientes conclusiones. Señalar que en estas conclusiones, cuando afirmamos que es más favorable la coproducción, se quiere decir que existe un conjunto concreto de combinaciones de (n,m) de coproducción en las que los costes totales de coproducción presentan ahorro frente a la no coproducción.

- En ambientes de alta, media y baja utilización, cuando la relación entre el coste de preparación de máquina y el coste de almacenamiento es igual para cada producto es más favorable la coproducción, Figura 4.4(1) y Figura 4.4(2).
- Si los costes de *setup* y almacenamiento son iguales, con tasas de producción iguales, es más favorable la coproducción para todas las utilizaciones de la máquina, Figura 4.4(3) y Figura 4.4(4). Concretamente en el caso 4, Figura

4.4(4), en el que las demandas de los productos son muy similares, se aprecia que cuando aumenta la utilización de la máquina, el conjunto de opciones de coproducción que supera en costes a la producción independiente crece y es muy amplio.

- Si el coste de *setup* de *b* es mayor que el de *a*, entonces no es más favorable la coproducción. Esto muestra que, aunque se cumplen las hipótesis iniciales del problema, el sistema no siempre tiende a la coproducción, porque opta por la solución más barata (coproducción deliberada), Figura 4.4(5). Si el coste de *setup* de *a* es mayor que el de *b*, entonces el sistema tiende a la coproducción, Figura 4.4(6).
- Si el coste de *setup* de coproducción es mayor que los costes de *setup* independientes, la ventaja en costes de la coproducción depende de la diferencia de los costes de almacenamiento de cada producto, y en ese sentido el modelo es muy sensible a un cambio en estos costes, Figura 4.4(7) y Figura 4.4(8).
- Si los costes de *setup* en coproducción son menores que los costes de *setup* independientes, es más favorable la coproducción. La bondad de las distintas combinaciones de *n* y *m* dependerá de los costes de almacenamiento y de los costes de *setup* de cada producto, Figura 4.4(9) y Figura 4.4(10).

4.4 Conclusiones

Se presenta el algoritmo *DCC-ELSP-2P* para definir los parámetros que permiten minimizar los costes de producir dos productos *a* y *b*, con demanda no sustituible. Se define la coproducción deliberada como aquella en la que es posible decidir si se coproduce o no.

Para evaluar los costes de producir se deben optimizar las cantidades de producto a fabricar. Se asume que el producto *a* cumple, $d_a/p_{ab} > d_b/p_{ba}$ siendo p_{ab} , ratio de producción para el producto *a* en coproducción *a+b*, p_{ba} ratio de producción para el producto *b* en coproducción *a+b*, y que la opción de coproducción más adecuada es producir *a* y *a+b*. Partiendo de estas consideraciones se define un modelo de costes totales en función del tiempo de ciclo *T*, el número de veces *n* que se lanzará la fabricación del producto *a* y el número de veces *m* que se coproducirá *a+b*. Este modelo considera el coste del número de *setups* realizados y del coste de almacenamiento de los productos dentro de ese ciclo, y depende de tres variables, dos de ellas discretas. Para la resolución del mismo se restringe el problema con la incorporación de que $(n=1) \vee (m=1)$. El modo de cálculo de los tamaños de ciclo *T* para cada una de las opciones será diferente. Así, el problema se bifurca en dos modelos para los dos casos diferentes, $(n \geq 1, m=1)$ y $(n=1, m \geq 1)$. El valor de *T* que se obtenga de estos modelos será función de *n* o *m* según sea el caso. La dinámica de trabajo que integra estos dos modelos esta descrita en el algoritmo *DCC-ELSP-2P*. La solución planteada es intuitivamente

encuadrable para dos productos en las aproximaciones del *ELSP*, ciclo común y periodo básico.

Se ha presentado una aplicación numérica para mejorar la comprensión de la dinámica de los modelos. A partir de estos ejemplos se observa la importancia de la correcta deliberación de la coproducción puesto que aunque un juego de datos cumpla todos los supuestos, no siempre la mejor opción es la coproducción. La bondad de la opción de coproducción depende de la relación entre los costes de *setup* y de almacenamiento, ratios de producción y demandas. Se observa que cuanto más similares sean los parámetros el sistema más tiende a la coproducción. Sin embargo, si escogemos mal el modo de coproducir los productos los costes se disparan, tanto de inventario como de *setups*. Si nos apoyamos en el algoritmo *DCC-ELSP-2P* para decidir el mejor modo de coproducir, los ahorros en costes son considerables.

Capítulo 5

Descripción de las Heurísticas para el DCC-ELSP

5.1 Introducción

En el presente capítulo se describen las heurísticas que se emplean para la resolución del problema del DCC-ELSP (*Deliberate Controlled Coproduction Economic Lot Scheduling Problem*), es decir, Problema de Programación del Lote Económico con Coproducción Deliberada y Controlada. Concretamente se aplican en un entorno multi-item mixto, en el que se considera la posible coproducción deliberada y controlada de productos en parejas de dos, y la producción de manera aislada de otros productos. Se diseñan una serie de heurísticas para el problema de DCC-ELSP a partir de la modificación de las siguientes heurísticas: heurística basada en el periodo económico (EOQ-EMQ) (Harris, 1913; Harris, 1990), heurística basada en el periodo básico (Doll y Whybark, 1973), heurística de (Fransoo, 1993), heurística de (Vergin y Lee, 1978), heurística de la Longitud de Ciclo Dinámica (Leachman y Gascon, 1988). De todas las versiones planteadas se considera oportuno restringir el campo a nueve heurísticas. Las heurísticas diseñadas van a ser capaces de establecer planes de fabricación que indiquen en cada periodo productivo el producto o productos a fabricar, considerando la posibilidad de coproducción, y la cantidad prevista a fabricar. En posteriores capítulos, se evaluará si estas heurísticas modelan adecuadamente el fenómeno de coproducción, para ello, se simularán a partir de unos experimentos cuyo propósito, diseño y resultados serán descritos exhaustivamente.

5.2 Heurísticas para el problema del DCC-ELSP

Las heurísticas planteadas en esta tesis para la resolución del problema del DCC-ELSP podrían ser empleadas en la industria, al no ser demasiado complejo su entendimiento e implementación. Estas heurísticas van a determinar qué producto se ha de fabricar, cómo se ha de fabricar y cuánto se ha de fabricar.

A continuación, se muestra una gráfica que incluye un esquema general que resume la estructura básica de las heurísticas y que será comentada en los párrafos consecutivos.

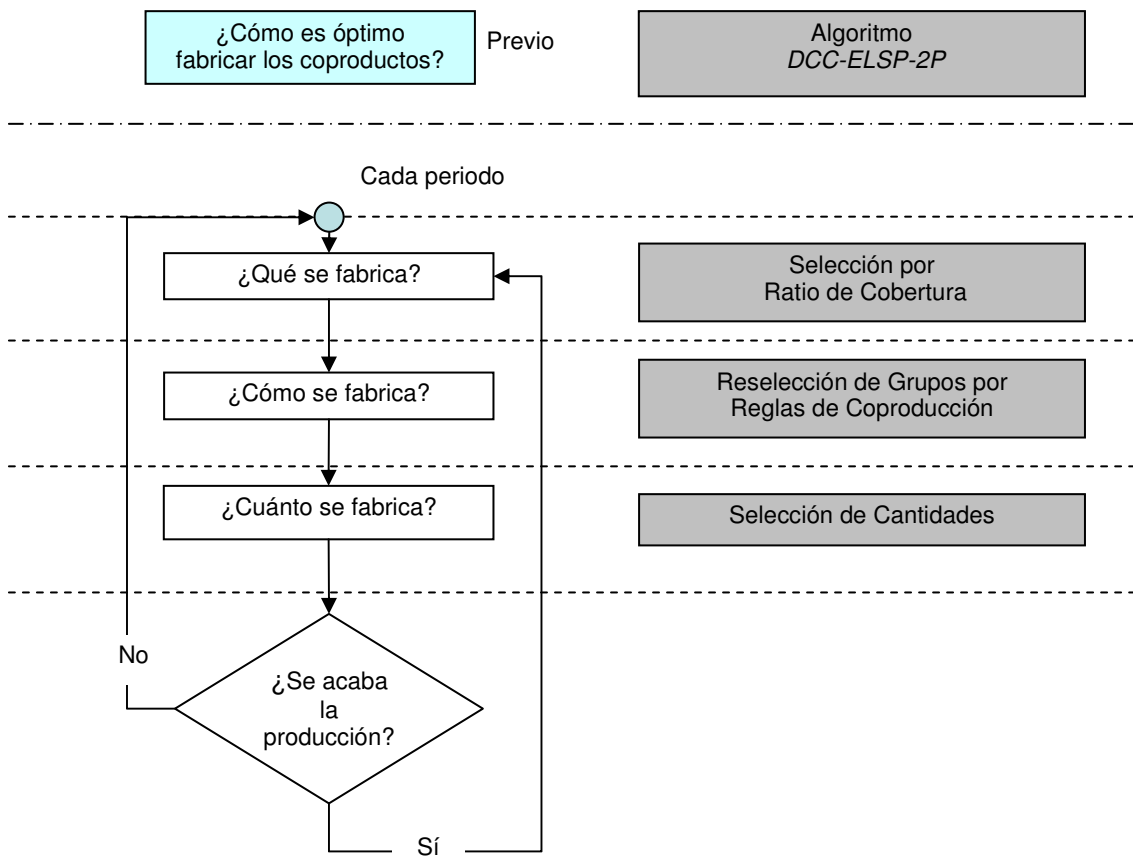


Figura 5.1 Esquema General de las Heurísticas

En primer lugar, se realiza un cálculo previo del concepto clave de esta tesis, esto es, la coproducción deliberada y controlada en el entorno del problema del ELSP (DCC-ELSP). Para resolver esta cuestión se aplica el algoritmo DCC-ELSP-2P descrito en el capítulo 4 para todas las parejas de coproductos. Mediante este algoritmo se puede obtener de modo teórico el modo más barato de producir dos coproductos de manera teórica. Como se detalla a continuación, al encontrarse en un ambiente multi-ítem mixto en el que no todos los productos pueden

coproducirse, con una demanda no determinista, se considera necesario reforzar el concepto de la elección de la coproducción en cada iteración, mediante la aplicación de una serie de reglas de selección de la coproducción.

Para determinar qué producto se ha de fabricar se va a emplear el concepto de *run out* o ratio de cobertura. Al ser un concepto común para todas las heurísticas se considera conveniente desarrollarlo en el apartado de conceptos comunes a todas las heurísticas. De modo introductorio, señalar que, el *run out (RO)* es un parámetro que proporciona información sobre las unidades de tiempo de demanda que dispone cada uno de los productos de acuerdo con su inventario. Parece lógico que el producto a producir en un periodo concreto, se seleccione de acuerdo con este criterio. Además este es el criterio empleado en literatura del *ELSP (Segerstedt, 1999)*.

Una vez conocido el producto que se ha de fabricar, la heurística responde a la pregunta: ¿cómo se va a fabricar?. En este punto reaparece el concepto de la coproducción deliberada y controlada en el entorno del problema del *ELSP (DCC-ELSP)*. Para resolver esta cuestión aunque ya se ha aplicado previamente el algoritmo *DCC-ELSP-2P*, la heurística dispone de una segunda fase en el proceso de decisión de la coproducción deliberada. Como ya se ha comentado, esto permite la adaptación de la coproducción en el entorno multi-ítem con demanda no determinista. Así mediante una serie de reglas se establece si sigue siendo adecuada o no la coproducción, es decir, se decide si el producto a fabricar se ha de fabricar de modo aislado o conjuntamente con su coproducto en cada situación concreta. Las reglas de coproducción definidas en esta tesis se integran en todas las heurísticas, y se considera conveniente dedicarles un apartado completo.

Por último, una vez decidido cómo se va a fabricar el/los producto/s, la heurística responde a la pregunta: ¿cuánto se ha de fabricar de cada producto?. Para responder a esta pregunta se consideran los niveles de inventario. Esto es, se considera el inventario existente de cada producto y los niveles de inventarios superiores e inferiores. Los límites inferiores se consideran para lanzar una orden de fabricación y los límites superiores para detener la producción. Estos valores de inventarios, como se desarrolla en apartados posteriores, se calculan de acuerdo con el tiempo de ciclo T . En el caso de la coproducción T es función de la combinación de la coproducción óptima que se ha precalculado con el algoritmo *DCC-ELSP-2P*. Además tanto para los no coproductos como para los coproductos existen dos modos de calcular T , basándose en la idea del *EMQ* tradicional (Harris, 1913) o empujado (Doll y Whybark, 1973). En el apartado de conceptos comunes a las heurísticas se considera en detalle estos conceptos. Partiendo de estos inventarios, dependiendo de la sofisticación de la heurística, el método para obtener la cantidad a fabricar es más o menos elaborado.

Una vez conocida la estructura general de las distintas heurísticas se considera adecuado su presentación. Para esto, se enumeran de modo completo de acuerdo con la siguiente regla:

Nombre Heurística / (Autor, Año) / Modificación Incorporada / (Autor, Año modificación)

El modo abreviado de citarlas será de acuerdo con su nombre que como se observará a continuación coincide con su numeración.

- Heurística 1 / (Harris, 1913) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* / (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 1

- Heurística 2 / (Doll&Whybark, 1973) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* embuclado / (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 2

- Heurística 3/ (Fransoo, 1993) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* / (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 3

- Heurística 4/ (Fransoo, 1993) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* embuclado/ (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 4

- Heurística 5/ (Vergin Lee, 1978) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* embuclado / (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 5

- Heurística 6/ (Leachman y Gascon, 1988) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* embuclado al inicio de la heurística y en el recálculo del periodo básico/ (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 6

- Heurística 7/ (Leachman y Gascon, 1988) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* embuclado sólo al inicio de la heurística/ (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 7

- Heurística 8/ (Leachman y Gascon, 1988) (Fransoo, 1993) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* empujado al inicio de la heurística y en el recálculo del periodo básico, Tiempo de Ciclo Maximizado / (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 8

- Heurística 9/ (Leachman y Gascon, 1988) (Fransoo, 1993) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* empujado sólo al inicio de la heurística, Tiempo de Ciclo Maximizado / (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 9

En el anexo A.5, que se encuentra al final del documento para facilitar su localización, se encuentra este detalle de nomenclatura.

Algunas de las heurísticas planteadas son relativamente sencillas, mientras que otras resultan más elaboradas y complejas. El motivo de la inclusión de heurísticas aparentemente sencillas como podrían ser las heurísticas 1,2,3,4 es doble. Por un parte la posibilidad de un mejor entendimiento del comportamiento e influencia del fenómeno de la coproducción y por otra comprender el valor de añadir sofisticación en la reglas de programación. La heurística 1, es una regla sencilla, puesto que los ítems son producidos inicialmente de acuerdo con su cantidad económica, de acuerdo con el algoritmo *DCC-ELSP-2P*. Pero persistiendo el cambio de producción a otro ítem en secuencia de *RO* cuando el inventario de algún ítem cae por debajo de un determinado nivel. La heurística 2, basada en (Doll y Whybark, 1973), esto es, con un tiempo de ciclo T empujado a partir del obtenido por el algoritmo *DCC-ELSP-2P*, es un poco más elaborada, puesto que, los ítems son producidos de acuerdo a su tamaño de ciclo objetivo calculado considerando todos los productos del sistema. Sin embargo la dinámica es la misma que la heurística 1 de modo que un ítem se produce hasta que el inventario de otro ítem cae por debajo de un determinado nivel. Las heurísticas 3,4 basadas en la regla de (Fransoo, 1993) sólo contemplan la producción de un ítem hasta una cantidad máxima, sin importarle el comportamiento del resto de los ítems. Así se puede afirmar que las dos primeras heurísticas 1 y 2 son políticas *preemptives* (s,S), y la heurísticas 3, 4 son no *preemptives*.

La heurística 5 basada en (Vergin y Lee, 1978) se encuentra en una posición intermedia respecto a complejidad, aunque en posteriores análisis en ocasiones se agrupa con las heurísticas 1,2,3,4 por similitud de comportamiento. Las heurísticas 6,7,8,9 si se pueden categorizar como las más elaboradas de este trabajo. Por todo esto se describen detalladamente en su correspondiente apartado. Señalar tan sólo que partiendo de la base de una política multi-ítem (s,S) consideran unos tiempos de ciclo para cada una de las opciones productivas que son dinámicos en el tiempo.

Estos tiempos de ciclo, que dependen de la holgura entre opciones productivas, son revisados periodo a periodo para poder responder a las diferencias entre los niveles de inventario planeados y los niveles de inventario reales así como los cambios en los ratios de demanda.

En el apartado siguiente se describen los parámetros comunes y punto de partida de todas las heurísticas: el cálculo de los tiempos de ciclo, el cálculo de los ratios de cobertura, de las secuencias de producción y de los niveles de inventarios. Previamente se considera necesario incluir un apartado de notación.

5.3 Notación

A continuación se indica la notación común utilizada en las heurísticas de acuerdo con la Tabla 3.1. Al margen de esto, cada heurística puede incorporar unas variables e índices específicos cuya notación se indica en su propio apartado.

Por simplificaciones en la nomenclatura se empleará un índice genérico i que tendrá distintas connotaciones. En primer lugar, de acuerdo con la notación siempre que en algún parámetro o variable aparezca el subíndice i (A_i, c_i, T_i, \dots) hará referencia a un valor de no coproducción. En segundo lugar siempre que el índice i se corresponda con un producto que no puede coproducirse y siempre se fabrica de manera aislada se remarcará que $i \notin \{C\}$, siendo $\{C\}$, de acuerdo con la notación el conjunto de los no coproductos. En tercer lugar, siempre que aparezca i junto con j se asumirá que el producto $i \in \{C\}$.

Tabla 5.1 Parámetros y variables de decisión

Símbolo	Definición
i	Índice de ítems
i, j	Índice de ítems susceptibles a coproducirse de modo que se cumple $\frac{d_i}{p_{ij}} < \frac{d_j}{p_{ji}}$
C	Conjunto formado por todos los ítems que se coproducen
d_i, d_j	Demanda del producto i, j (unidades por unidades de tiempo)
p_i, p_j	Ratio de producción del producto i, j (unidades por unidades de tiempo)
p_{ij}, p_{ji}	Ratio de coproducción del producto i en coproducción $i+j$, y j en coproducción $i+j$ (unidades por unidades de tiempo)
A_i, A_j	Coste de preparación de máquina para la producción del producto i, j (unidades de tiempo)
A_{ij}	Coste de preparación de máquina para la coproducción de los productos i, j (unidades de tiempo)
h_i, h_j	Coste de almacenamiento del producto i, j (unidades por unidades de tiempo)
c_i, c_j	Tiempo de cambio de partida del producto i, j (unidades de tiempo)
c_{ij}	Tiempo de cambio de partida del producto i cuando se produce con el producto j (unidades de tiempo)
RO_i, RO_j	Ratio de cobertura del producto i, j (unidades de tiempo)
$Pos(i), Pos(j)$	Posición del producto i, j en la secuencia de RO
n	Número de veces que se lanzará la fabricación del producto i
m	Número de veces que se coproducirá $i+j$
T_i	Tiempo de ciclo para el producto i (unidades de tiempo)
T^e	Tiempo de ciclo empujado para el producto i (unidades de tiempo)
$T_{ij} = T^*$	Tiempo de Ciclo modelo $ELSP-DCC-2P$ para la coproducción de los productos i, j (unidades de tiempo)
T_{ij}^e	Tiempo de Ciclo modelo $ELSP-DCC-2P$ con algoritmo empujado para la coproducción de los productos i, j (unidades de tiempo)
I_i, I_j	Inventario actual del producto i, j (unidades)
τ	Velocidad relativa de consumo de lo fabricado bajo coproducción, $\tau = \frac{p_{ij} d_j}{p_{ji} d_i}$
Q_i	Cantidad de i fabricada aisladamente (unidades)
Q_{ij}, Q_{ji}	Cantidad de i fabricada con coproducción $i+j$, y cantidad de j fabricada con coproducción $i+j$ (unidades)
CT	Coste total (unidades monetarias)

5.4 Conceptos comunes a las heurísticas

A continuación, se definen una serie de conceptos como son el ratio de cobertura, la secuencia de producción, los tiempos de ciclo, el inventario de seguridad y los niveles de inventarios, que son empleados por todas las heurísticas.

5.4.1 Ratio de cobertura

Para definir qué producto se ha de producir se emplean los tiempos del ratio de cobertura. El ratio de cobertura o *run out* es un concepto muy empleado en la realidad industrial que hace referencia a las unidades de tiempo de demanda de las que se dispone en inventario. Existen modos más o menos completos para definirlo. Se puede definir el ratio de cobertura RO , de acuerdo con (Gascon et al., 1994), como el tiempo previsto hasta que el inventario de la pieza i , denominado I_i , caiga hasta un punto de relanzamiento igual al inventario de seguridad ss_i más la demanda prevista d_i , durante el tiempo de cambio de partida, denominado c_i .

$$RO_i = \frac{I_i - ss_i}{d_i} - c_i \quad (5.1)$$

También es posible definir el RO sin considerar la corrección del inventario de seguridad ss_i y del tiempo de cambio de partida (Gascon et al., 1994; Soman et al., 2006) como en (5.2).

$$RO_i = \frac{I_i}{d_i} \quad (5.2)$$

Este modo de cálculo se puede considerar el más intuitivo. Para obtener la cobertura de inventario existente, se divide el inventario actual de un producto i , I_i por su demanda d_i .

A partir de estos dos modos de cálculo del RO , otras alternativas para el cálculo serían las siguientes:

$$RO_i = \frac{I_i}{d_i} - c_i \quad (5.3)$$

$$RO_i = \frac{I_i - ss_i}{d_i} \quad (5.4)$$

En (5.3) se considera el inventario actual de un producto i , I_i , su demanda d_i y su tiempo de *setup* denominado c_i . En (5.4) se considera el inventario actual de un producto i , I_i , su demanda d_i y su inventario de seguridad ss_i .

El siguiente modo de cálculo del RO que se describe en (5.5) es original de esta tesis y considera el ratio de utilización de la máquina. Se define como el inventario actual de un producto i , I_i , multiplicado por el factor de utilización de la máquina $(1 - d_i/p_i)$, dividido por la demanda de ese producto d_i .

$$RO_i = \frac{I_i(1 - d_i/p_i)}{d_i} \quad (5.5)$$

5.4.2 Secuencia Productiva por Ratio de cobertura

En el desarrollo de las correspondientes heurísticas, se observará que, para determinar la secuencia productiva los productos, se ordenarán de acuerdo con el valor de su *run out*, en orden creciente, esto es:

$$RO_i < RO_{i'} < RO_{i''} < \dots < RO_n \quad i, i', i'' \in \{1 \dots n\} \quad (5.6)$$

Si se define la posición de un producto en la secuencia de RO como $pos(i)$ tendríamos la secuencia de RO , definida por los RO de los productos ordenados de acuerdo con los valores de $pos(i)$ decrecientes. El producto i en primera posición es aquel cuya variable $pos(i)$ es igual a 1.

En el caso de que existan productos que coincidan en RO se debiera plantear el método de desempate en función de diferentes criterios. Se pueden considerar los siguientes: dar prioridad a aquel ítem que dispone de una demanda mayor, dar prioridad a aquel que disponga de un coste mayor de demanda sin cubrir, dar prioridad a aquel cuyo coste de almacenamiento menor. En los casos en el que los datos de los productos sean muy dispersos en cuanto a costes podría resultar una producción poco equilibrada en casos de empate. Se podría decidir un concepto de orden en la secuencia más balanceado, que obligará que en aquellos casos de segundo empate consecutivo entre dos productos, se escogiera el producto contrario a la primera elección.

5.4.3 Tiempo de Ciclo

Para el cálculo del tiempo de ciclo con coproducción se han considerado dos alternativas. En primer lugar el tiempo de ciclo económico con coproducción que parte del método de la *EMQ-EOQ* (Harris, 1913), comúnmente denominado tiempo de ciclo económico. En segundo lugar, el método del tiempo de ciclo empujado con coproducción, que parte de la idea del periodo básico (Doll y Whybark, 1973) con la restricción de potencias de 2 (Haessler y Hogue, 1976). Esta segunda aproximación, se basa en un método iterativo que intenta empujar los tiempos de ciclo económicos con coproducción, de modo que todos sean múltiplos enteros de un periodo denominado base.

5.4.3.1 Tiempo de Ciclo con Coproducción Deliberada y Controlada: algoritmo DCC-ELSP-2P

El modo de cálculo del tiempo de ciclo con coproducción *DCC-ELSP-2P*, establece, sin pérdida de generalidad, como producto *i* aquel producto cuya pendiente relativa de consumo en coproducción es mayor que la de su coproducto *j* de acuerdo con (5.7):

$$\frac{d_i}{p_{ij}} > \frac{d_j}{p_{ji}} \quad (5.7)$$

Destacar que en este capítulo y en los posteriores, al tratarse de un sistema en el que aparecen más de dos productos, se realiza la conversión de la notación de coproductos. El coproducto *a* del capítulo 4 se considera *i* en este capítulo 5, y el coproducto *b*, se considera *j*.

Se define un tiempo de ciclo, *T*, en que se lanza la producción de *i*, *n* veces y *m* veces la coproducción de *i+j*. Esto es así, puesto que tal y como se demostró en el capítulo 4, la opción más interesante es el lanzamiento de *i* y el lanzamiento de *i+j*. El modelo de costes totales es función del tiempo de ciclo *T*, el número de veces *n* que se lanzará la fabricación del producto *i* y el número de veces *m* que se coproducirá *i+j*. Los costes totales son función del coste del número de *setups* realizados y del coste de almacenamiento de los productos dentro del ciclo *T* (8).

$$CT(T, m, n) = \frac{1}{T} (mA_{ij} + nA_i) + h_i I_i + h_j I_j \quad (5.8)$$

Siendo para en este caso, (I_i, I_j) , de acuerdo con la notación del capítulo 4, los inventarios promedios, que no actuales, de los productos *i* y *j* que son función de *T*, *n* y *m* como se desarrolla en detalle en el capítulo 4.

De acuerdo con el capítulo 4, el método de resolución del problema *DCC-ELSP* considera dos ramas de resolución. Estas ramas condicionan la descripción de las variables del problema y de todas las heurísticas planteadas en esta tesis. A continuación se incluyen los teoremas resultado del capítulo 4 que especifican como calcular los resultados de acuerdo con cada rama. Se considera adecuado incluir los teoremas de nuevo pues las fórmulas (5.9) y (5.10) se encuentran rescritas con los subíndices genéricos *i*, *j* de modo que se facilita el seguimiento del capítulo. Es claro, que tras la aplicación en un caso concreto del algoritmo *DCC-ELSP-2P*, uno de los resultados que se obtienen es la combinación (n, m) óptima para la coproducción de esos dos productos, siendo posible identificar la rama a la que pertenece y aplicar correctamente las fórmulas. El caso (1,1) se encuentra en ambas ramas y tal como se demostró, se obtiene el mismo resultado para ambas ramas. En el caso de que las definiciones de los niveles de inventarios, no coincidan

para ambas ramas, siempre se va a tomar el resultado más seguro, esto es, los mayores niveles de inventario.

Teorema 1: El tiempo de ciclo para el caso donde $n \geq 1$ y $m=1$, que minimiza los costes totales se calcula como:

$$T^* = \sqrt{\frac{2(A_{ij} + nA_i)}{h_j d_j \left(1 - \frac{d_j}{p_{ji}}\right) + h_i d_i \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}}\right) + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right)\right]}} \quad (5.9)$$

Teorema 2: El tiempo de ciclo para el caso donde $n=1$ y $m \geq 1$, que minimiza los costes totales se calcula como:

$$T^* = \sqrt{\frac{2(mA_{ij} + A_i)}{\frac{h_j d_j}{m} \left(1 - \frac{d_j}{p_{ji}}\right) + h_i d_i \left[\frac{\tau^2}{m^2} \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}}\right) + \frac{(1-\tau)^2}{m} \left[\left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) + 1 - \frac{1}{m}\right] + \frac{\tau}{m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}}\right) + \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau)\right]}} \quad (5.10)$$

Para calcular el modo más barato de realizar la producción de los dos productos i y j , deliberando el uso de la coproducción, se emplea el algoritmo de resolución descrito también en el capítulo 4, denominado algoritmo *DCC-ELSP-2P*. Como resultado del algoritmo se obtiene como resultado la opción más económica de producir i y j , con sus parámetros asociados. Es decir, si es más barato no coproducir devuelve el tamaño de ciclo del *ELSP* tradicional T_i . Si la coproducción es lo más económico devuelve el valor de T^*, n, m a partir del cual se deriva Q_i, Q_j, Q_{ij} con las fórmulas apropiadas según el caso ($n \geq 1, m = 1$) o ($n = 1, m \geq 1$). En ocasiones, será necesario denominar a ese tiempo de ciclo óptimo T^* como T_{ij}^* , siendo i y j los coproductos a fabricar, para facilitar el seguimiento de determinados algoritmos. Como ya se comentó en el apartado de notación, $T^* = T_{ij}^*$.

El tiempo de ciclo sin coproducción para un producto i , se obtiene de acuerdo con la fórmula clásica de (Harris, 1913), esto es (5.11), tal y como se detallo en el apartado 3.3.2.1 del capítulo 3.

$$T_i = \sqrt{2A_i / h_i d_i (1 - d_i / p_i)} \quad i = 1..n \quad (5.11)$$

5.4.3.2 Tiempo de Ciclo Embuclado con Coproducción Deliberada y Controlada: algoritmo *DCC-ELSP-2P* embuclado

El cálculo del tiempo de ciclo denominado periodo básico o embuclado tal y como se describe en detalle en el capítulo del estado del arte fue planteado en (Bomberger, 1966) y redescubierto en (Doll y Whybark, 1973) mediante un procedimiento iterativo. La idea de la aproximación del periodo básico consiste en trabajar con la cantidad del tamaño de lote económico (Harris, 1913) bajo la restricción de la capacidad de la máquina. Esta restricción, consiste en la necesidad de la existencia de tiempo suficiente de cada máquina para su preparación (Bomberger, 1966).

La adaptación de la estrategia de (Doll y Whybark, 1973) para incorporar el fenómeno de coproducción resulta un método iterativo que se encuentra descrito a continuación. El método consiste en forzar a los tiempos de ciclo con coproducción a ser múltiplo entero del periodo básico que se denomina T_{pb} y es la longitud suficiente para acomodar la producción de todos los productos del ciclo.

Los pasos del nuevo procedimiento son los siguientes:

Paso 1. Calcular el tiempo de ciclo económico de cada producto del modo adecuado (no coproducción, coproducción)

$$T = \left\{ \begin{array}{l} \text{Coproducción "i + j"} \longrightarrow T_{ij} = T^* \leftarrow \text{Algoritmo } DCC - ELSP - 2P \\ \text{No coproducción "i"} \longrightarrow T_i = \sqrt{2A_i/h_i d_i (1 - d_i/p_i)} \end{array} \right\} \quad (5.12)$$

Paso 2. Seleccionar el menor T como la estimación inicial del periodo básico T_{pb}

$$T_{pb} = \min(T_{ij}, T_i) \quad (5.13)$$

Paso 3. Determinar el múltiplo entero potencia de dos, k_i^- o k_i^+ , o k_{ij}^- o k_{ij}^+ para cada producto definido por:

$$k = \left\{ \begin{array}{l} \text{Coproducción "i + j"} \longrightarrow k_{ij}^- \leq T_{ij}/T_{pb} \leq k_{ij}^+ \\ \text{No coproducción "i"} \longrightarrow k_i^- \leq T_i/T_{pb} \leq k_i^+ \end{array} \right\} \quad (5.14)$$

Paso 4. El valor del múltiplo entero para cada producto se establece igual a k_i^- o k_i^+ (no coproducción), o k_{ij}^- o k_{ij}^+ (coproducción), dependiendo de cual de los dos factores suponga el menor valor en la ecuación de costes. Para el caso de no coproducción los costes se calculan de acuerdo con la ecuación 3.10 y para el caso

de coproducción de acuerdo con la ecuación 5.9. Para calcular estos costes el valor del tiempo de ciclo T y de (n,m) para el caso de coproducción es el siguiente:

$$T^e = \left\{ \begin{array}{l} \text{Coproducción "i + j"} \longrightarrow T_{ij}^e = T_{ij} k_{ij} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Algoritmo} \\ \text{DCC - ELSP - 2P} \\ \text{fijando T} \end{array} \right\} \rightarrow \{n, m\} \\ \text{No coproducción "i"} \longrightarrow T_i^e = T_i k_i \end{array} \right\} \quad (5.15)$$

La descripción del algoritmo *DCC-ELSP-2P* fijando T , se encuentra en el anexo A.2.

Paso 5. Recalcular el periodo básico T_{pb} empleando las nuevas estimaciones de k_i, k_{ij}, n, m de acuerdo con (5.16).

$$T_{pb} = \frac{2 \left(\sum_{i \in C} A_i / k_i \right) + 2 \left(\sum_{i \in C} n A_i + m A_{ij} / k_{ij} \right)}{\sum_{i \in C} h_i d_i (1 - d_i / p_i) + \left\{ \begin{array}{l} \xrightarrow{(n,1)} \sum_{i,j \in C} \left(h_j d_j \left(1 - \frac{d_j}{p_{ji}} \right) + h_i d_i \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}} \right) + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_i}{p_i} \right) \right] \right) \\ \xrightarrow{(1,m)} \sum_{i,j \in C} \left\{ \frac{h_j d_j}{m} \left(1 - \frac{d_j}{p_{ji}} \right) + h_i d_i \left[\frac{\tau^2}{m^2} \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}} \right) + \frac{(1-\tau)^2}{m} \left[\left(1 - \frac{d_i}{p_i} \right) + 1 - \frac{1}{m} \right] + \frac{\tau}{m} \left(1 - \frac{1}{m} \right) \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}} \right) + \left(1 - \frac{1}{m} \right)^2 (1-\tau) \right] \right\} \end{array} \right\}} \quad (5.16)$$

Paso 6. Volver al paso 3 y recalcular los nuevos k_i^-, k_i^+, k_{ij}^- y k_{ij}^+ empleando el T_{pb} del paso 5 y considerando T_i, T_{ij} del paso 1 para cada i . El procedimiento finaliza cuando las iteraciones consecutivas producen los mismos valores k_i y k_{ij} en el paso 4.

Con este método se obtiene el periodo básico T_{pb} y los k_i, k_{ij} de cada uno de los productos y coproductos. Así a partir de las siguientes fórmulas se calcula el tiempo de ciclo de cada uno de los productos de acuerdo con su opción productiva:

$$T^e = \left\{ \begin{array}{l} \text{Coproducción "i + j"} \longrightarrow T^e = T_{ij}^e = T_{pb} k_{ij} \\ \text{No coproducción "i + j"} \longrightarrow T_i^e = T_{pb} k_i \end{array} \right\} \quad (5.17)$$

Para estos valores de tiempo de ciclo en el caso de coproducción se ha de buscar otra vez la condición (n, m) más económica de acuerdo con el algoritmo DCC-ELSP-2P fijando el valor de T^* . El procedimiento para realizar esto se encuentra descrito en el anexo A.2.

Señalar en ese punto la letra e en el superíndice del tiempo de ciclo que permite distinguir si el parámetro corresponde con el T sin empujado (modificada con coproducción) o con el T empujado, T^e (procedimiento iterativo con coproducción).

5.4.4 Inventario de seguridad

Para la definición del inventario de seguridad se va a emplear el método definido en (Silver et al., 1998) que considera la varianza de la demanda y los niveles de servicio deseados. Concretamente se va a trabajar con un nivel de servicio del 95%.

Para un producto que no se coproduce, se puede definir el inventario de seguridad de acuerdo con (5.18):

$$ss_i = 1.65\sigma\sqrt{T_i(1-d_i/p_i)} \quad (5.18)$$

en cuya fórmula σ es la desviación estándar de la demanda, y T_i es el ciclo objetivo considerado. De manera explícita, se indica la aproximación el tiempo de ciclo debida a (Harris, 1913), esto es T_i , pero la fórmula es equivalente sustituyendo T_i por T_i^e (Doll y Whybark, 1973).

Otros modos de cálculo del inventario de seguridad, que no son adaptados en esta tesis, se describen en el anexo A.3.

Para los productos que tienen la opción de coproducirse, esto es, el producto i junto con el producto j , se definen los siguientes inventarios de seguridad de acuerdo con las gráficas descritas en detalle en el capítulo 4.

$$ss_i = \begin{cases} \text{caso } (n,1) \rightarrow ss_i^{(n,1)} = z\sigma_i \sqrt{\max\left(\tau T^*, \frac{1-\tau}{n} T^*\right)} \\ \text{caso } (1,m) \rightarrow ss_i^{(1,m)} = z\sigma_i \sqrt{\frac{Q_{ji}^{(1,m)}}{d_j}} = z\sigma_a \sqrt{\frac{T^*}{m}} \end{cases} \quad (5.19)$$

Como se puede apreciar en (5.19), se deben considerar los inventarios para los dos casos, tanto $(n,1)$ como $(m,1)$. Para el caso $(n,1)$ se considera como el equivalente al T_i de la fórmula, el valor máximo de τ multiplicado por el tiempo de ciclo, y el factor $(1-\tau)$ por el tiempo de ciclo y partido por n . Esto es así, porque se quiere cubrir las incertidumbres en la demanda del producto i en el periodo más largo en que tarde en consumirse j .

$$ss_j = \begin{cases} \text{caso } (n,1) \rightarrow ss_j^{(n,1)} = z\sigma_j \sqrt{\frac{Q_{ji}^{(n,1)}}{d_j}} = z\sigma_j \sqrt{T^*} \\ \text{caso } (1,m) \rightarrow ss_j^{(1,m)} = z\sigma_j \sqrt{\frac{Q_{ji}^{(1,m)}}{d_j}} = z\sigma_j \sqrt{\frac{T^*}{m}} \end{cases} \quad (5.20)$$

En el caso del inventario de seguridad del producto j (5.20), se considera el criterio más conservador, pues quiere cubrir las incertidumbres de la demanda en el periodo T/m , que es el más largo de acuerdo con las gráficas del capítulo 4.

El tiempo de ciclo en todas las fórmulas puede ser: el que se encuentra explícitamente indicado, esto es, T^* , que es el calculado de acuerdo con la aproximación del modelo *DCC-ELSP-2P* ($T^* = T_{ij}$) o el obtenido a partir del procedimiento iterativo que permite obtener T_{ij}^e .

5.4.5 Niveles de Inventario

En el siguiente apartado, se describe el modo de cálculo de los distintos niveles de inventario mínimos y máximos considerados por las heurísticas. En ambos casos, se considera adecuado indicarlos tanto para el caso de coproducción como no coproducción.

Señalar que tal y como ocurría en las fórmulas del inventario de seguridad descritas en el apartado anterior, las fórmulas (5.22),(5.23),(5.25), (5.26) y (5.27), el tiempo de ciclo puede ser: el que se encuentra explícitamente indicado, esto es T^* , que es el calculado de acuerdo con la aproximación del modelo *DCC-ELSP-2P*

($T^* = T_{ij}$) o el obtenido a partir del procedimiento iterativo que permite obtener T_{ij}^e . Esta afirmación se traslada para las fórmulas de los niveles de inventarios de productos no susceptibles a coproducción, esto es la fórmula (5.21). En estas fórmulas de manera explícita se indica la aproximación el tiempo de ciclo T_i , pero la fórmula es equivalente sustituyendo T_i por T_i^e .

5.4.5.1 Nivel Mínimo de Inventario

El nivel mínimo de inventario, es el valor del inventario a partir del cual se debería lanzar la orden de fabricación, por ello, en ocasiones se denomina punto de reorden. Se define tanto para un producto que no es susceptible de coproducirse, como para que aquellos productos que pueden ser coproducidos.

Para un producto que no se coproduce, se puede definir el inventario mínimo de acuerdo con (Soman et al., 2006):

$$s_i = ss_i + c_i d_i \quad (5.21)$$

Como se observa esta fórmula (5.21) considera el inventario de seguridad del producto y la demanda estimada en el tiempo de preparación de máquina o de *setup*.

Para una pareja de coproductos i, j se define un nivel de inventario mínimo para cada uno de ellos. Esto es así, puesto que cada uno debe ser capaz por él mismo de lanzar la orden de fabricación.

Para el coproducto i el nivel mínimo de inventario es el siguiente (5.22):

$$s_i = \begin{cases} \text{caso } (n, 1) \rightarrow s_i^{(n,1)} = ss_i^{(n,1)} + c_i d_i = z\sigma_i \sqrt{\max\left(\tau T^*, \frac{1-\tau}{n} T^*\right)} + c_i d_i \\ \text{caso } (1, m) \rightarrow s_i^{(1,m)} = ss_i^{(1,m)} + c_i d_i = z\sigma_i \sqrt{\frac{T^*}{m}} + c_i d_i \end{cases} \quad (5.22)$$

En el caso del inventario mínimo del producto j (5.23) para definir su tiempo de *setup* se continúa con un criterio conservador. Se considera el máximo de los tiempos de *setup* de su producción aislada, de la producción de i , y de la producción conjunta.

$$s_j = \begin{cases} \text{caso } (n,1) \rightarrow s_j^{(n,1)} = ss_j^{(n,1)} + \max(c_i, c_j, c_{ij}) d_j = \\ = z\sigma_b \sqrt{T^*} + \max(c_i, c_j, c_{ij}) d_j \\ \text{caso } (1,m) \rightarrow s_j^{(1,m)} = ss_b^{(1,m)} + \max(c_i, c_j, c_{ij}) d_j = \\ = z\sigma_b \sqrt{\frac{T^*}{m}} + \max(c_i, c_j, c_{ij}) d_j \end{cases} \quad (5.23)$$

Estos inventarios, se obtienen a partir de la observación de las gráficas descritas en detalle en el capítulo 4 y sobre las que se desarrolla el modelo *DCC-ELSP-2P*.

5.4.5.2 Nivel Máximo

Es el valor límite o máximo que pueden alcanzar los inventarios de los productos. Para un producto que no se coproduce, se puede definir de acuerdo con (5.24):

$$S_i = s_i + T_i d_i (1 - d_i / p_i) \quad (5.24)$$

En esta fórmula (Soman et al., 2006) se considera que el inventario máximo es la suma del inventario mínimo y la máxima cantidad a producir en un ciclo, siendo está última la demanda durante el tiempo de ciclo. El factor $(1-d/p)$ hace referencia a la suposición de que el producto se consume conforme se va produciendo.

Para una pareja de coproductos i, j de acuerdo con el modelo *DCC-ELSP-2P* se deben definir teóricamente tres niveles de inventario. Un nivel de inventario para el caso en el que se lanza la producción del producto i de manera aislada (5.25). Dos niveles de inventario más, para cuando se lanza la coproducción de $i+j$ de manera conjunta, uno de ellos hace referencia al nivel que ha de alcanzar el inventario de i (5.26), y el siguiente al nivel máximo del inventario de j (5.27) . A continuación se presentan las correspondientes fórmulas.

La fórmula (5.25) indica que el inventario del producto i , para los casos (n,m) definidos, es igual a la cantidad que se debe fabricar cuando se fabrica el producto i de manera aislada más su nivel mínimo.

$$S_i = \begin{cases} \text{caso } (n,1) \rightarrow S_i^{(n,1)} = Q_i^{(n,1)} + s_i^{(n,1)} = \\ = \frac{1-\tau}{n} d_i T^* + z\sigma_i \sqrt{\max\left(\tau T^*, \frac{1-\tau}{n} T^*\right)} + c_i d_i \\ \text{caso } (1,m) \rightarrow S_i^{(1,m)} = Q_i^{(1,m)} + s_i^{(1,m)} = \\ = (1-\tau) d_i T^* + z\sigma_i \sqrt{\frac{T^*}{m}} + c_i d_i \end{cases} \quad (5.25)$$

$$S_{ij} = \begin{cases} \text{caso } (n,1) \rightarrow S_{ij}^{(n,1)} = Q_i^{(n,1)} + Q_{ij}^{(n,1)} + s_i^{(n,1)} = \\ = \frac{1-\tau}{n} d_i T^* + \tau d_i T^* + z\sigma_i \sqrt{\max\left(\tau T^*, \frac{1-\tau}{n} T^*\right)} + c_i d_i \\ \text{caso } (1,m) \rightarrow S_{ij}^{(1,m)} = \max\left(2Q_{ij}^{(1,m)}, Q_i^{(1,m)} + Q_{ij}^{(1,m)}\right) + s_i^{(1,m)} = \\ = \max\left(2\frac{\tau}{m} d_i T^*, (1-\tau) d_i T^* + \frac{\tau}{m} d_i T^*\right) + z\sigma_i \sqrt{\frac{T^*}{m}} + c_i d_i \end{cases} \quad (5.26)$$

$$S_{ji} = \begin{cases} \text{caso } (n,1) \rightarrow S_{ji}^{(n,1)} = Q_{ji}^{(n,1)} + s_j^{(n,1)} = \\ = \frac{\tau d_j T^*}{\alpha} + z\sigma_j \sqrt{T^*} + \max(c_i, c_j, c_{ij}) d_j \\ \text{caso } (1,m) \rightarrow S_{ji}^{(1,m)} = Q_{ji}^{(1,m)} + s_j^{(1,m)} = \\ = \frac{d_j T^*}{m} + z\sigma_j \sqrt{\frac{T^*}{m}} + \max(c_i, c_j, c_{ij}) d_j \end{cases} \quad (5.27)$$

Las fórmulas (5.26) y (5.27) como ya se ha comentado describen los dos niveles de inventario cuando se coproduce $i+j$. El inventario S_{ij} (5.26) se considera para el caso $(n,1)$ como la cantidad fabricada de manera aislada, más la cantidad fabricada junto con j mas el nivel mínimo. Para el caso $(1,m)$ se considera el máximo entre dos veces la cantidad de $i+j$ o la máxima cantidad a fabricar total de i , esto es la correspondiente a la fabricación aislada y la fabricación conjunta $i+j$. En el inventario S_{ji} (5.27) se considera para todas las opciones (n,m) el nivel máximo como, la cantidad a fabricar de manera conjunta que corresponda más el nivel mínimo.

Aunque teóricamente no se ha considerado, puede ocurrir que la demanda del producto i , sin ser nula, fuera temporalmente pequeña, de modo que es necesario fabricar j de manera aislada. Este necesidad, sería temporal, hasta que se restableciese la demanda de i , así se define también el inventario máximo de producto j de acuerdo con (5.28).

$$S_j = \begin{cases} \text{caso } (n,1) \rightarrow S_j^{(n,1)} = s_j^{(n,1)} + \sqrt{\frac{2A_j d_j}{h_j \left(1 - \frac{d_j}{p_j}\right)}} = \\ = z\sigma_j \sqrt{T^*} + \max(c_i, c_j, c_{ij}) d_j + \sqrt{\frac{2A_j d_j}{h_j \left(1 - \frac{d_j}{p_j}\right)}} \\ \text{caso } (1,m) \rightarrow S_j^{(1,m)} = s_j^{(1,m)} + \sqrt{\frac{2A_j d_j}{h_j \left(1 - \frac{d_j}{p_j}\right)}} = \\ = z\sigma_j \sqrt{\frac{T^*}{m}} + \max(c_i, c_j, c_{ij}) d_j + \sqrt{\frac{2A_j d_j}{h_j \left(1 - \frac{d_j}{p_j}\right)}} \end{cases} \quad (5.28)$$

Este inventario también permitirá cubrir cualquier desajuste que se produzca en la heurística. Como se observa, se considera que en caso de que se fabrique, se lanzará su cantidad de acuerdo con su tamaño de ciclo económico sin coproducción.

5.5 Reglas para la selección de la Coproducción

La coproducción deliberada permite decidir si desea coproducir dos coproductos $i+j$ o no. Como se ha comentado para decidir qué es lo más económico de manera teórica se plantea el algoritmo *DCC-ELSP-2P*, que supone sin pérdida de generalidad que es más barato coproducir $i+j$ y solo producir i para compensar el desajuste de las demandas medias y los ratios de fabricación conjunta ($d_i/p_{ij} > d_j/p_{ji}$). Como se describió en el esquema de la Figura 5.1 el algoritmo *DCC-ELSP-2P* se plantea al inicio de la heurística con las demandas medias. Por lo tanto puesto que la heurística se enfrente a una demanda estocástica estacionaria con un determinado nivel de incertidumbre, se considera oportuno plantear estas reglas dinámicas que se aplican en cada iteración. Estas reglas permiten ajustar o dar más margen a la opción de coproducir los productos. Esto ocurre puesto que partiendo de la producción de un coproducto i o j , se consideran distintas condiciones sobre el ratio de cobertura o el inventario del coproducto pareja j o i respectivamente. Para simplificar la notación, se denominará i al producto cuya producción debe iniciarse de acuerdo con la secuencia de producción, y j a su posible coproducto. Pero debe considerarse que si i fuera j , las reglas se aplicarían del mismo modo sustituyendo en ellas j por i .

Se supone, de acuerdo con los ratios de cobertura que establecen la secuencia de fabricación, que el producto que ha de producirse es el producto i , pues $pos(i)=1$.

5.5.1 Basadas en la secuencia del Ratio de Cobertura

Las reglas siguientes se basan en la relación que existe en la secuencia entre el ratio de cobertura del producto a fabricar i con $pos(i)=1$ y el ratio de cobertura de su coproducto j . Si la condición correspondiente se cumple la coproducción entre los producto i y j se produce.

$$(1) \ pos(j) \leq 2$$

$$(2) \ pos(j) \leq 3$$

$$(3) \ pos(j) \leq 4$$

$$(4) \ pos(j) \leq 5$$

La condición (1) indica que el coproducto j es el siguiente al producto i en la secuencia de ratios de cobertura. La condición (2), (3) y (4) amplía el margen en la continuidad de la secuencia de los ratios de cobertura. Se ha de considerar el número de productos que existen para fabricar para que éstas reglas sean correctamente interpretadas. Por ejemplo, si se dispone sólo de 3 productos en la lista de producción, tanto la regla (4) como la regla (5) serán equivalentes a la regla (3). Del mismo modo si el número de productos ha producir fuera muy elevado se podría continuar con la secuencia de reglas hasta alcanzar un margen en la secuencia de RO que se considerase oportuno. En esta tesis, como se comentará en el siguiente apartado, se va a considerar el problema de (Bomberger, 1966) que considera 10 ítems, por lo que se ha testado que este es el margen máximo más adecuado.

5.5.2 Basadas en el valor del Ratio de Cobertura

Las siguientes reglas consideran las unidades de tiempo de cobertura del coproducto j . Se ha experimentado que lo más adecuado es considerar su valor relacionándolo con el tiempo de ciclo correspondiente.

$$(1) \ RO_j \leq T_{ij}/3$$

$$(2) \ RO_j \leq T_{ij}/2$$

$$(3) \ RO_j \leq 2T_{ij}/3$$

$$(4) \ RO_j \leq 3T_{ij}/4$$

Estas condiciones valoran a cuanta distancia en unidades de tiempo está el momento teórico de producción del coproducto j de acuerdo con su tiempo de ciclo

$T_{ij} = T^*$ (algoritmo DCC-ELSP-2P). En el caso de considerar el tiempo de ciclo obtenido a partir del procedimiento iterativo adaptado para la coproducción, las fórmulas son equivalentes sustituyendo T_{ij} por T_{ij}^e .

5.5.3 Basadas en el inventario del coproducto

Las reglas siguientes se fijan en el valor del inventario del producto j para determinar si éste debe coproducirse o no junto con el producto i . Un posible planteamiento es el siguiente siendo S_j el nivel máximo de inventario del producto:

$$(5) I_j \leq s_j$$

$$(6) I_j \leq 0.25(ss_j + S_j)$$

$$(7) I_j \leq 0.5(ss_j + S_j)$$

$$(8) I_j \leq 0.75(ss_j + S_j)$$

Así se plantean cuatro niveles en el inventario que se corresponden con cuatro franjas de coproducción $i+j$ (Vidal-Carreras y Garcia-Sabater, 2009).

5.6 Restricciones comunes a las heurísticas: Longitud de ciclo mínima

Se ha observado en la literatura revisada que es común que se establezca una duración mínima para las órdenes de fabricación con el objetivo de evitar tamaños de lote excesivamente pequeños (Leachman y Gascon, 1988; Soman et al., 2006). En el caso de que no se cumpla esta longitud mínima de ciclo, que en muchas ocasiones no está claramente definida, el sistema se puede tomar un periodo libre (Gascon et al., 1994) o aumentar el tamaño de lote de un modo indefinido de nuevo (Soman et al., 2006). Es por ello, que se considera interesante plantear una serie de parámetros que permitan distintas opciones en relación a la longitud de ciclo mínima. Estas opciones, se traducen en distintas combinaciones de acuerdo con la nomenclatura del capítulo 6, en el que son descritas en detalle. Sin embargo, para facilitar el entendimiento de la dinámica de las distintas heurísticas aquí desarrollado, se considera adecuado presentar brevemente estas posibles combinaciones.

5.6.1.1 Heurísticas 1,2,3,4,5

Se puede decidir si existe un mínimo *run length* de producción, es decir si cada fabricación debe tener una duración mínima. Esta puede ser: su tiempo de *setup* o una serie de horas determinadas. En caso de que este mínimo *run length* no se

cumpla, se puede decidir si el sistema se toma el resto del periodo libre o si se va a escoger el siguiente producto/productos de acuerdo con la lista de *run outs* decrecientes. Se plantean las distintas combinaciones, que consideran las variables parámetro, horas y periodo libre, y que se detallan en el capítulo 6.

5.6.1.2 Heurísticas 6,7,8,9

En este caso la longitud mínima del ciclo de fabricación se establece en dos fases. Por una parte, a través del valor de un parámetro f , que se comentará en detalle en esta capítulo en los apartados 5.12,5.13,5.14,5.15, de descripción de la dinámica de las heurísticas 6,7,8,9 respectivamente.

Por otra parte en los mismos apartados, 5.12,5.13,5.14,5.15, se comentará la existencia de un parámetro "*Cota Min Holgura*", que se denominará en el texto cota mínima en la holgura y que permite regular la distancia o holgura mínima que debiera existir entre dos órdenes de producción. Además, en el caso de que esta cota mínima en holgura no se cumpla, en el sistema existe la opción de tomarse o no un periodo libre.

5.7 Heurística 1

Esta heurística parte del cálculo de los periodos o tiempos de ciclo económicos modificados con coproducción de acuerdo con el algoritmo *DCC-ELSP-2P*. A través de este algoritmo se obtiene el tiempo de ciclo óptimo que permite la obtención de las variables Q_i, Q_{ij}, Q_{ji} con las que se determinan los niveles de inventario. En esta heurística, el relanzamiento de la fabricación de un producto cuyo inventario se está agotando toma precedencia sobre el hecho de completar la reposición de otro. Es decir, se trata de una política *preemptive*. El valor de estos límites de producción se ha definido en el apartado 5.4.5 de Niveles de Inventario. De acuerdo con lo allí descrito, el nivel mínimo se denomina de manera genérica s y el nivel máximo S . En esta heurística las fórmulas de los inventarios se consideran con un tiempo de ciclo sin empujado ($T^* = T_{ij}, T_i$).

Para la descripción de la dinámica de las distintas heurísticas se considera adecuado plantear un diagrama. Este diagrama se apoyará en las descripciones detalladas de cada uno de los pasos, que aparecen en el desarrollo de las heurísticas. Siguiendo esta metodología, se presenta el siguiente diagrama que será común para las heurísticas 1,2,5 y la descripción de los pasos para esta heurística 1.

5.7.1 Diagrama de la heurística

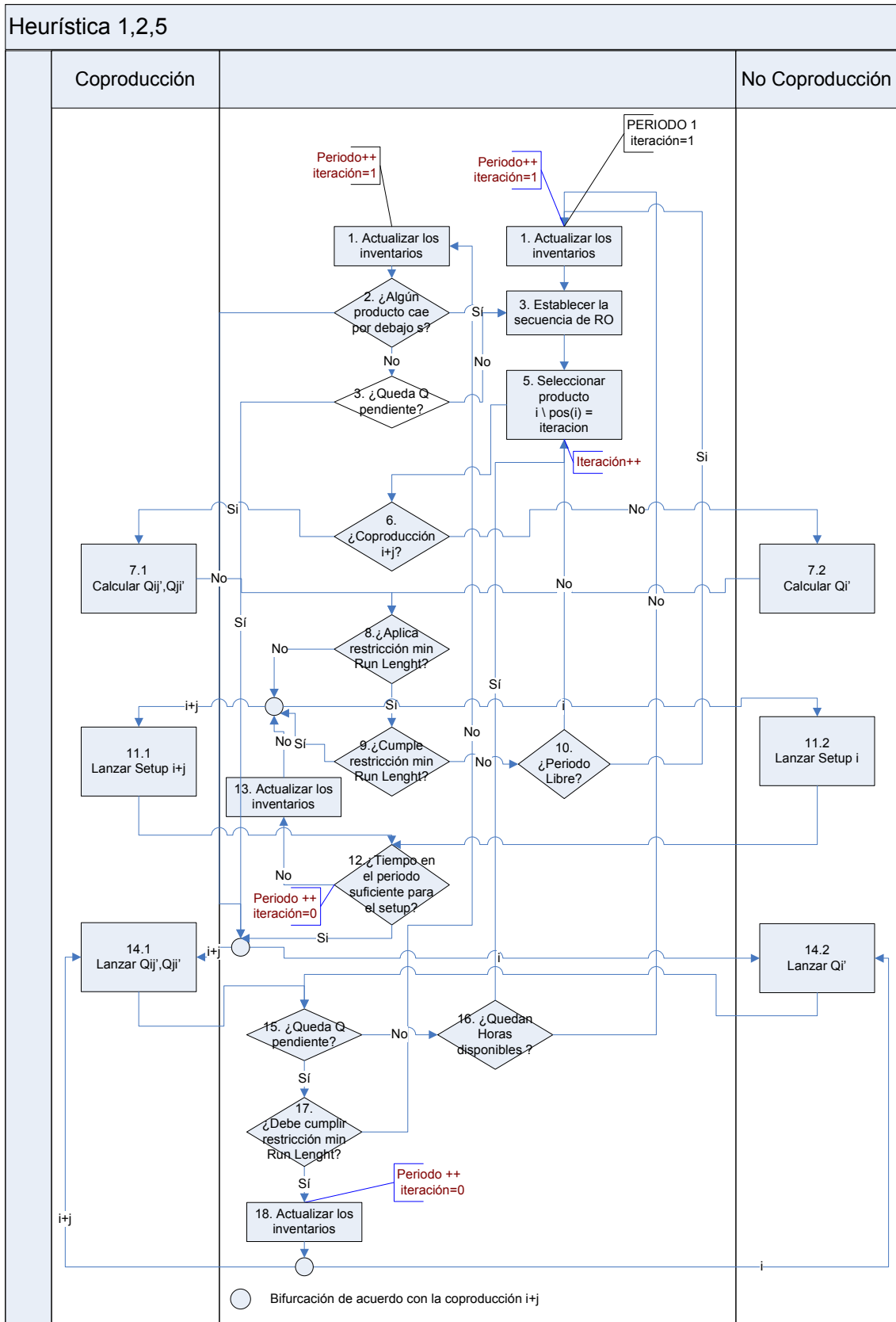


Figura 5.2 Diagrama de la dinámica de la heurística 1,2,5

5.7.2 Detalle de la dinámica

Los pasos empleados por la heurística son los descritos a continuación. Se ha de considerar una variable denominada *iteración*, cuyo valor inicial es igual a 1, y que sólo puede incrementar en el interior de un periodo si se lanza más de una opción productiva.

Paso 1. Se actualizan los inventarios de los productos I_i de acuerdo con sus demandas d_i y las cantidades producidas en el periodo anterior, si es que existen.

La variable iteración toma el valor 1 para ese periodo.

Paso 2. Se comprueba si el inventario de algún producto ha caído por debajo de su inventario mínimo s . En caso de que esto ocurra, se acude al paso 4 y en caso contrario, se acude al paso 3.

Paso 3. Se plantea la pregunta de si existe cantidad pendiente del anterior periodo. En caso de que si que exista, se continúa la producción pendiente, de acuerdo con el paso 14.1 (coproducción) o 14.2 (no coproducción). En el caso de que no exista cantidad pendiente, se acude al paso 4.

Paso 4. Se calcula el ratio de cobertura de los productos, RO_i . Los productos se ordenan de acuerdo con el valor de su ratio de cobertura, en orden creciente:

$$RO_i < RO_{i'} < RO_{i''} < \dots < RO_n \quad i, i', i'' \in \{1 \dots n\} \quad (5.29)$$

Paso 5. Se selecciona el producto a fabricar, esto es, aquel que producto i cumple $pos(i) = 1$. En la primera iteración de cada periodo siempre se va a considerar el producto que ocupa la primera posición en la secuencia de RO .

Paso 6. De acuerdo con los datos de entrada, el algoritmo *DCC-ELSP-2P* y las reglas de selección de producción, se averigua si es adecuada la coproducción para producto i junto con otro producto j (coproducto).

Si la coproducción está contemplada y resulta conveniente se pasa al paso 7.1 en caso contrario se pasa al paso 7.2.

Paso 7.1. Se calcula la cantidad a producir de los productos i y j cuando se producen conjuntos. Es decir Q_{ij} (cantidad de producto i a producir cuando se coproduce con j) y Q_{ji} (cantidad de producto j a producir cuando se coproduce con i). Para esto, se consideran los niveles máximos a alcanzar para cada producto, esto es, S y los inventarios actuales I . A partir de esto, se busca el parámetro común durante el proceso de fabricación de i con j que es el tiempo de fabricación t_{ij} :

$$\left. \begin{aligned} t1_{ij} &= \frac{S_{ij} - I_i}{p_{ij}} \\ t1_{ji} &= \frac{S_{ji} - I_j}{p_{ji}} \end{aligned} \right\} \rightarrow \begin{cases} t'_{ij} = \min(t1_{ij}, t1_{ji}) \rightarrow \\ t_{ij} = \min(t'_{ij}, \text{uds de tiempo disponible en el periodo}) \end{cases} \quad (5.30)$$

Como la dinámica de esta heurística se repite cada periodo, es necesario incluir la rectificación de las unidades de tiempo disponibles en ese periodo. Estas unidades de tiempo disponibles en el periodo, se obtienen descontando al tiempo real el tiempo de *setup* del proceso.

En el caso de que el tiempo disponible para la fabricación t_{ij} tenga un valor negativo, se iguala a cero. Esto es, porque en el periodo no existe tiempo suficiente para el *setup* del proceso.

$$\begin{aligned} Q_{ij}^t &= t_{ij} p_{ij} \\ Q_{ji}^t &= t_{ji} p_{ji} \end{aligned} \quad (5.31)$$

La cantidad a fabricar en el siguiente periodo, si es que existe, se va a denominar a partir de este momento cantidad pendiente y sería la siguiente.

$$\begin{aligned} Q_{ij}^{t+1} &= t'_{ij} p_{ij} - Q_{ij}^t \\ Q_{ji}^{t+1} &= t'_{ji} p_{ji} - Q_{ji}^t \end{aligned} \quad (5.32)$$

Paso 7.2. Se calcula la cantidad a producir del producto i , es decir Q_i , cuando se produce de manera aislada. Para esto se consideran los niveles máximos a alcanzar por el producto, esto es, S y los inventarios actuales I . Para el cálculo de Q_i , se considera el tiempo disponible en el periodo para fabricar. Este tiempo para fabricar se obtiene descontando al tiempo real el tiempo de *setup* del proceso.

$$t'_i = \frac{S_i - I_i}{p_i} \rightarrow t_i = \min(t'_i, \text{uds de tiempo disponible en el periodo}) \quad (5.33)$$

En el caso de que el tiempo disponible para la fabricación t_i tenga un valor negativo, se iguala a cero. Esto es, porque en el periodo no existe tiempo suficiente para el *setup* del proceso.

Se puede calcular la cantidad a producir del producto en ese periodo:

$$Q_i^t = t_i p_i \quad (5.34)$$

La cantidad a fabricar en el siguiente periodo, si es que existe, se va a denominar cantidad pendiente y sería la siguiente.

$$Q_i^{t+1} = t_i p_i - Q_i^t \quad (5.35)$$

Paso 8. Se considera si es de aplicación alguna de las restricciones respecto a la longitud mínima del lanzamiento. Como se ha comentado, estas restricciones exigen una longitud mínima de la tirada de fabricación que puede ser, su propio tiempo de *setup* o una serie de horas.

Paso 9. Si es de aplicación se considera si cumple la restricción. Para esto se realiza la siguiente comparación (5.36):

$$\text{longitud mínima (horas)} \leq \left\{ \begin{array}{l} t'_{ij}(\text{coproducción}) \\ t'_i(\text{coproducción}) \end{array} \right\} \quad (5.36)$$

Paso 10. En caso de que no se cumpla la restricción (5.36), de acuerdo con la combinación indicada en los parámetros de entrada, pueden ocurrir dos cosas:

- Se escoge un periodo libre (paso 1), que implica un salto de periodo y una inicialización de la variable iteración a 1.
- No se escoge un periodo libre (paso 5), que implica un incremento en la variable iteración para ese periodo (iteración=iteración+1).

Paso 11.1. Se lanza el *setup* de la opción productiva de coproducción.

Paso 11.2. Se lanza el *setup* de la opción productiva de no coproducción.

Paso 12. Se comprueba si existe tiempo suficiente en el periodo para la realización del *setup* completo. En caso de que se quede a mitad en un periodo se continúa en el siguiente, de modo que el periodo se incrementa en una unidad (paso 13). En caso de que exista tiempo suficiente el siguiente paso es el 14.1 (coproducción) o el 14.2 (no coproducción).

Paso 13. Se actualizan los inventarios de los productos I_i de acuerdo con sus demandas d_i y las cantidades producidas en el periodo anterior, si es que existen.

Paso 14.1. Se lanza la fabricación de la opción productiva de coproducción.

Paso 14.2. Se lanza fabricación de la opción productiva de no coproducción.

Paso 15. El sistema se pregunta si la cantidad pendiente a fabricar de acuerdo con el paso 7.1 (coproducción) o el paso 7.2 (no coproducción) es mayor que 0, esto es (5.37):

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{ij}^{t+1}(\text{coproducción}) \\ Q_i^{t+1}(\text{no coproducción}) \end{array} \right\} > 0 \quad (5.37)$$

Paso 16. En caso de que no exista cantidad pendiente y exista tiempo disponible en ese periodo, se vuelve al paso 5, incrementando la variable iteración en una unidad.

En caso de que no exista cantidad pendiente y no existan horas disponibles en el periodo, se vuelve al paso 1, que implica un salto de periodo y una inicialización de la variable iteración a 1.

Paso 17. En caso de que existe cantidad pendiente, se pregunta si debe cumplir la restricción de una longitud de ciclo mínima, de acuerdo con la combinación escogida en los datos de entrada. Si se debe cumplir la restricción, se salta al periodo siguiente y al paso 18. Si no se debe considerar ninguna restricción de longitud mínima del tiempo de ciclo, se pasa al paso 1.

Paso 18. Se actualizan los inventarios de los productos I_i de acuerdo con sus demandas d_i y las cantidades producidas en el periodo anterior, si es que existen y se continua la producción pendiente de acuerdo con el paso 14.1 (coproducción) o 14.2 (no coproducción).

5.8 Heurística 2

Esta heurística, parte del cálculo de los periodos o tiempos de ciclo económicos modificados con coproducción de acuerdo con el algoritmo *DCC-ELSP-2P* y empujados a través del procedimiento iterativo de (Doll y Whybark, 1973) modificado. Se trata de una heurística con una dinámica equivalente a la dinámica de la heurística 1 que incorpora un nuevo modo de calcular el tiempo de ciclo. En este caso el valor de los límites de producción definidos en el apartado 5.4.5 de Niveles de Inventario se deben aplicar considerando un tiempo de ciclo empujado (T_{ij}^e, T_i^e) .

5.9 Heurística 3

La heurística de (Fransoo et al., 1995) sugiere una política sencilla basada en conseguir tiempos de ciclo estables. La idea es mantener los tiempos de ciclo todo el tiempo posible. De este modo, la producción de un ítem no se ve afectada por las condiciones del resto de los productos, siendo una política claramente *no preemptive*. La incorporación de esta aproximación de Fransoo para el estudio del problema *DCC-ELSP-2P* en un entorno multi-ítem, se realiza del siguiente modo. Cada producto bien sea de modo aislado o mediante coproducción se va a fabricar hasta que alcanza su nivel de inventario máximo. Este nivel de inventario es el calculado de acuerdo con las fórmulas del apartado 5.4.5 de Niveles de Inventario. Para la consideración de los tiempos de ciclo en las fórmulas en esta

heurística 3, se considera el tiempo de ciclo indicado explícitamente en las mismas, esto es, el obtenido del modelo *DCC-ELSP-2P*, $T^* = T_{ij}$.

5.9.1 Diagrama de la heurística

El diagrama de las heurísticas 3,4 sería el siguiente. Se aprecia que es similar al de las heurísticas 1,2,5 sin considerar por ejemplo que algún inventario puede caer por debajo de un nivel mínimo s .

5.9.2 Detalle de la dinámica

Los pasos empleados por la heurística son los siguientes.

Paso 1. Se actualizan los inventarios de los productos I_i de acuerdo con sus demandas d_i y las cantidades producidas en el periodo anterior, si es que existen.

La variable iteración toma el valor 1 para ese periodo.

Paso 2. Se calcula el ratio de cobertura de los productos, RO_i . Los productos se ordenan de acuerdo con el valor de su ratio de cobertura, en orden creciente:

$$RO_i < RO_{i'} < RO_{i''} < \dots < RO_n \quad i, i', i'' \in \{1 \dots n\} \quad (5.38)$$

Paso 3. Se selecciona el producto a fabricar, esto es, aquel que producto i cumple $pos(i)=1$. En la primera iteración de cada periodo, siempre se va a considerar, el producto que ocupa la primera posición en la secuencia de RO .

Paso 4. De acuerdo con los datos de entrada, el algoritmo *DCC-ELSP-2P* y las reglas de selección de producción, se averigua si es adecuada la coproducción para producto i junto con otro producto j (coproducto).

Si la coproducción está contemplada y resulta conveniente se pasa al paso 5.1 en caso contrario se pasa al paso 5.2.

Paso 5.1. Se calcula la cantidad a producir de los productos i y j cuando se producen conjuntos. Es decir Q_{ij} (cantidad de producto i a producir cuando se coproduce con j) y Q_{ji} (cantidad de producto j a producir cuando se coproduce con i). Para esto, se consideran los niveles máximos a alcanzar para cada producto, esto es, S y los inventarios actuales I . A partir de esto, se busca el parámetro común durante el proceso de fabricación de i con j que es el tiempo de fabricación t_{ij} :

$$\left. \begin{aligned} t_{ij} &= \frac{S_{ij} - I_i}{p_{ij}} \\ t_{ji} &= \frac{S_{ji} - I_j}{p_{ji}} \end{aligned} \right\} \rightarrow \begin{cases} t'_{ij} = \min(t_{ij}, t_{ji}) \rightarrow \\ t_{ij} = \min(t'_{ij}, \text{uds de tiempo disponible en el periodo}) \end{cases} \quad (5.39)$$

Como la dinámica de esta heurística se repite cada periodo, es necesario incluir la rectificación de las unidades de tiempo disponibles en ese periodo. Estas unidades de tiempo disponibles en el periodo, se obtienen descontando al tiempo real el tiempo de *setup* del proceso.

En el caso de que el tiempo disponible para la fabricación t_{ij} tenga un valor negativo se iguala a cero. Esto es, porque en el periodo no existe tiempo suficiente para el *setup* del proceso.

$$\begin{aligned} Q_{ij}^t &= t_{ij} p_{ij} \\ Q_{ji}^t &= t_{ji} p_{ji} \end{aligned} \quad (5.40)$$

La cantidad a fabricar en el siguiente periodo, si es que existe, se va a denominar a partir de este momento cantidad pendiente y sería la siguiente.

$$\begin{aligned} Q_{ij}^{t+1} &= t'_{ij} p_{ij} - Q_{ij}^t \\ Q_{ji}^{t+1} &= t'_{ji} p_{ji} - Q_{ji}^t \end{aligned} \quad (5.41)$$

Paso 5.2. Se calcula la cantidad a producir del producto i , es decir Q_i , cuando se produce de manera aislada. Para esto, se consideran los niveles máximos a alcanzar por el producto, esto es, S y los inventarios actuales I . Para el cálculo de Q_i , se considera el tiempo disponible en el periodo para fabricar. Este tiempo para fabricar, se obtiene descontando al tiempo real el tiempo de *setup* del proceso.

$$t'_i = \frac{S_i - I_i}{p_i} \rightarrow t_i = \min(t'_i, \text{uds de tiempo disponible en el periodo}) \quad (5.42)$$

En el caso de que el tiempo disponible para la fabricación t_i tenga un valor negativo, se iguala a cero. Esto es, porque en el periodo no existe tiempo suficiente para el *setup* del proceso.

Se puede calcular la cantidad a producir del producto en ese periodo (5.43) :

$$Q_i^t = t_i p_i \quad (5.43)$$

La cantidad a fabricar en el siguiente periodo, si es que existe, se va a denominar cantidad pendiente y sería la siguiente (5.44):

$$Q_i^{t+1} = t'_i p_i - Q_i^t \quad (5.44)$$

Paso 6. Se considera si es de aplicación alguna de las restricciones respecto a la longitud mínima del lanzamiento. Como se ha comentado, estas restricciones, exigen una longitud mínima de la tirada de fabricación, que puede ser su propio tiempo de *setup* o una serie de horas (2,4,6,8).

Paso 7. Si es de aplicación se considera si cumple la restricción de longitud de ciclo mínima. Para esto se realiza la siguiente comparación (5.45):

$$longitud\ minima\ (horas) \leq \begin{cases} t'_{ij} (coproducción) \\ t'_i (coproducción) \end{cases} \quad (5.45)$$

Paso 8. En caso de que no se cumpla la restricción (5.45), de acuerdo con la combinación indicada en los parámetros de entrada, pueden ocurrir dos cosas:

- Se escoge un periodo libre (paso 1), que implica un salto de periodo y una inicialización de la variable iteración a 1.
- No se escoge un periodo libre (paso 3), que implica un incremento en la variable iteración para ese periodo (iteración=iteración+1).

Paso 9.1. Se lanza el *setup* de la opción productiva de coproducción.

Paso 9.2. Se lanza el *setup* de la opción productiva de no coproducción.

Paso 10. Se comprueba si existe tiempo suficiente en el periodo para la realización del *setup* completo. En caso de que se quede a mitad en un periodo, se continúa en el siguiente, de modo que el periodo se incrementa en una unidad. En caso de que exista tiempo suficiente el siguiente paso es el 12.1 (coproducción) o el 12.2 (no coproducción).

Paso 11. Se actualizan los inventarios de los productos I_i de acuerdo con sus demandas d_i y las cantidades producidas en el periodo anterior, si es que existen.

Paso 12.1. Se lanza la fabricación de la opción productiva de coproducción.

Paso 12.2. Se lanza fabricación de la opción productiva de no coproducción.

Paso 13. El sistema se pregunta si la cantidad pendiente a fabricar de acuerdo con el paso 5.1 (coproducción) o el paso 5.2 (no coproducción) es mayor que 0, esto es (5.37):

$$\begin{cases} Q_{ij}^{t+1} (coproducción) \\ Q_i^{t+1} (no coproducción) \end{cases} > 0 \quad (5.46)$$

Paso 14. En caso de que no exista cantidad pendiente y exista tiempo disponible en ese periodo, se vuelve al paso 4, incrementando la variable iteración en una unidad.

En caso de que no exista cantidad pendiente y no existan horas disponibles en el periodo, se vuelve al paso 1 que implica un salto de periodo y una inicialización de la variable iteración a 1.

Paso 15. Se actualizan los inventarios de los productos I_i de acuerdo con sus demandas d_i y las cantidades producidas en el periodo anterior, si es que existen y se continua la producción pendiente de acuerdo con el paso 12.1 (coproducción) o 12.2 (no coproducción).

5.10 Heurística 4

Esta heurística es equivalente a la heurística 3 con la diferencia de modo de calcular los tiempos de ciclo. En este caso el valor de los límites de producción definidos en el apartado 5.4.5 de Niveles de Inventario se deben aplicar considerando un tiempo de ciclo empujado (T_{ij}^e, T_i^e).

5.11 Heurística 5

El método original de (Vergin y Lee, 1978) refina el enfoque de (Magee y Boodman, 1967) y sugiere que es más económico establecer un inventario tal que sea capaz de soportar las fluctuaciones cíclicas en la demanda de todos los productos, que controlar la producción actual de modo que el inventario de los productos se encuentre equilibrado. En esta tesis, se modifica la heurística para que permita incluir el fenómeno de coproducción. Esta heurística introduce unos nuevos ratios $a_i, a_{ij} = a_{ji}$ para cada producto o grupo de productos basados en la longitud de ciclo objetivo de cada producto comparado con los anteriores, que va a permitir limitar la cantidad a producir en cada iteración de manera más exhaustiva. Esta heurística va a contemplar tres niveles de inventarios. Por una parte el nivel mínimo y el nivel máximo tal y como se definieron en el apartado 5.4.5. Por otra parte un nuevo nivel de inventario que define a continuación, y que se va a denominar nivel de inventario nivelado SB (*balanced stock*).

5.11.1 Nivel de Inventario nivelado SB

Se define en este apartado el nivel de inventario nivelado SB para el producto i , cuando es fabricado de manera aislada, o mediante coproducción con j .

$$SB = \left\{ \begin{array}{l} \text{Coproducción "i + j"} \longrightarrow SB_{ij} = a_{ij} \sum_i I_i \\ \text{No Coproducción "i"} \longrightarrow SB_i = a_i \sum_i I_i \end{array} \right\} \quad (5.47)$$

El valor del ratio a_i , se define por tanto como (5.48) y el del ratio a_{ij} de acuerdo con (5.49).

$$a_i = \frac{2k_i d_i \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right)}{\sum_{i \in C} k_i d_i \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) + \left. \begin{array}{l} \xrightarrow{(n,1)} \sum_{i,j \in C} \left[k_{ij} d_j \left(1 - \frac{d_j}{p_{ji}}\right) + d_i \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}}\right) k_{ij} + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) k_i \right] \right] \\ \xrightarrow{(1,m)} \sum_{i,j \in C} \left\{ k_{ij} \frac{d_j}{m} \left(1 - \frac{d_j}{p_{ji}}\right) + d_i \left[\frac{\tau^2}{m^2} \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}}\right) k_{ij} + \frac{(1-\tau)^2}{m} k_i \left[\left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] + \frac{\tau}{m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}}\right) k_{ij} + \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) k_i \right] \right\} \end{array} \right\}}$$

$$(5.48) \quad 2^* \left\langle \begin{array}{l} \xrightarrow{(n,1)} \sum_{i,j \in C} \left[k_{ij} d_j \left(1 - \frac{d_j}{p_{ji}}\right) + d_i \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}}\right) k_{ij} + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) k_i \right] \right] \\ \xrightarrow{(1,m)} \sum_{i,j \in C} \left\{ k_{ij} \frac{d_j}{m} \left(1 - \frac{d_j}{p_{ji}}\right) + d_i \left[\frac{\tau^2}{m^2} \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}}\right) k_{ij} + \frac{(1-\tau)^2}{m} k_i \left[\left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] + \frac{\tau}{m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}}\right) k_{ij} + \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) k_i \right] \right\} \end{array} \right\rangle$$

$$a_{ij} = \frac{\sum_{i \in C} k_i d_i \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) + \left. \begin{array}{l} \xrightarrow{(n,1)} \sum_{i,j \in C} \left[k_{ij} d_j \left(1 - \frac{d_j}{p_{ji}}\right) + d_i \left[\tau^2 \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}}\right) k_{ij} + \frac{(1-\tau)^2}{n} \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) k_i \right] \right] \\ \xrightarrow{(1,m)} \sum_{i,j \in C} \left\{ k_{ij} \frac{d_j}{m} \left(1 - \frac{d_j}{p_{ji}}\right) + d_i \left[\frac{\tau^2}{m^2} \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}}\right) k_{ij} + \frac{(1-\tau)^2}{m} k_i \left[\left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) + 1 - \frac{1}{m} \right] + \frac{\tau}{m} \left(1 - \frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{d_i}{p_{ij}}\right) k_{ij} + \left(1 - \frac{1}{m}\right)^2 (1-\tau) k_i \right] \right\} \end{array} \right\}}$$

(5.49)

Se observa como las variables $a_i, a_{ij} = a_{ji}$ permiten nivelar el inventario del producto, empleando los tiempos de ciclo objetivo.

Estas expresiones difieren a las de (Vergin y Lee, 1978) en dos cuestiones. En primer lugar, su heurística no considera coproducción de modo que sólo definen a_i para cada producto. En segundo lugar (Vergin y Lee, 1978) consideran la aproximación del tiempo de ciclo común que implica que todos los productos solo pueden producirse una vez en el ciclo, mientras que en esta heurística, se considera la aproximación del tiempo de ciclo empujado que permite que los productos se puedan producir mas de una vez en el mismo ciclo.

5.11.2 Detalle de la dinámica

El diagrama que describe la dinámica de esta heurística se corresponde con la Figura 5.2. El detalle de la dinámica es equivalente al enunciado en el apartado 5.7.2 salvo en el paso 6.1 y en el paso 6.2, que se corresponden con el modo de calcular la cantidad a fabricar de los productos. En esta heurística, la producción de un ítem i o de un conjunto de ítems $i+j$, continua siempre que ningún otro ítem caiga por debajo de su nivel mínimo de inventario s , y la producción del ítem i o $i+j$ no supere un nivel de inventario máximo S o el nivel de inventario nivelado SB . A continuación, se describen los pasos 7.1 y 7.2 que reflejan esta estrategia productiva.

Paso 7.1. Se calcula la cantidad a producir de los productos i y j cuando se producen conjuntos. Es decir Q_{ij} (cantidad de producto i a producir cuando se coproduce con j) y Q_{ji} (cantidad de producto j a producir cuando se coproduce con i). Para esto, se consideran los niveles máximos a alcanzar para cada producto, esto es, S los inventarios nivelados SB y los inventarios actuales I . A partir de esto, se busca el parámetro común durante el proceso de fabricación de i con j que es el tiempo de fabricación t_{ij} :

$$\left. \begin{aligned}
 t1_{ij} &= \frac{S_{ij} - I_i}{p_{ij}} \\
 t1_{ji} &= \frac{S_{ji} - I_j}{p_{ji}} \\
 t2_{ij} &= \frac{SB_{ij} - I_i}{p_{ij}} \\
 t2_{ji} &= \frac{SB_{ij} - I_j}{p_{ji}}
 \end{aligned} \right\} \rightarrow \begin{cases}
 t'_{ij} = \min(t1_{ij}, t1_{ji}, t2_{ij}, t2_{ji}) \rightarrow \\
 t_{ij} = \min(t'_{ij}, \text{uds de tiempo disponible en el periodo})
 \end{cases} \quad (5.50)$$

Como la dinámica de esta heurística se repite cada periodo, es necesario incluir la rectificación de las unidades de tiempo disponibles en ese periodo. Estas unidades de tiempo disponibles en el periodo, se obtienen descontando al tiempo real el tiempo de *setup* del proceso.

En el caso de que el tiempo disponible para la fabricación t_{ij} tenga un valor negativo, se iguala a cero. Esto es porque en el periodo, no existe tiempo suficiente para el *setup* del proceso.

$$\begin{aligned} Q_{ij}^t &= t_{ij} p_{ij} \\ Q_{ji}^t &= t_{ji} p_{ji} \end{aligned} \quad (5.51)$$

La cantidad a fabricar en el siguiente periodo, si es que existe, se va a denominar a partir de este momento cantidad pendiente y sería la siguiente.

$$\begin{aligned} Q_{ij}^{t+1} &= t'_{ij} p_{ij} - Q_{ij}^t \\ Q_{ji}^{t+1} &= t'_{ji} p_{ji} - Q_{ji}^t \end{aligned} \quad (5.52)$$

Paso 7.2. Se calcula la cantidad a producir del producto i , es decir Q_i , cuando se produce de manera aislada. Para esto, se consideran los niveles máximos a alcanzar por el producto, esto es, S y los inventarios actuales I . Para el cálculo de Q_i , se considera el tiempo disponible en el periodo para fabricar. Este tiempo para fabricar, se obtiene descontando al tiempo real el tiempo de *setup* del proceso.

$$\left. \begin{aligned} t1_i &= \frac{S_i - I_i}{p_i} \\ t2_i &= \frac{SB_i - I_i}{p_i} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \begin{cases} t'_i = \min(t1_i, t2_i) \rightarrow \\ t_i = \min(t'_i, \text{uds de tiempo disponible en el periodo}) \end{cases} \quad (5.53)$$

En el caso de que el tiempo disponible para la fabricación t_i tenga un valor negativo, se iguala a cero. Esto es porque en el periodo no existe tiempo suficiente para el *setup* del proceso.

Se puede calcular la cantidad a producir del producto en ese periodo:

$$Q_i^t = t_i p_i \quad (5.54)$$

La cantidad a fabricar en el siguiente periodo, si es que existe, se va a denominar cantidad pendiente y sería la siguiente.

$$Q_i^{t+1} = t'_i p_i - Q_i^t \quad (5.55)$$

5.12 Heurística 6

Esta heurística parte de la idea de (Leachman y Gascon, 1988) que integra el control de los inventarios basándose en la retroalimentación de los niveles de los mismos y el mantenimiento de los ciclos de producción económicos. La política también se va a aplicar periodo a periodo para tomar decisiones relativas a que ítem o conjunto de ítems se han de producir, cómo y en qué cantidad en ese periodo. Esas cantidades reflejan los ciclos de producción, que son revisados periodo a periodo para poder responder a las diferencias entre los niveles de inventario planeados y los niveles de inventario reales, así como, los cambios en los ratios de demanda. Es decir, la principal aportación de esta heurística, es la consideración de unos tiempos de ciclo para cada una de las opciones productivas que son dinámicos en el tiempo.

Este método emplea los mismos conceptos de niveles de inventarios mínimos y máximos contemplados en el apartado 5.4.5, siendo considerado en este caso, un tiempo de ciclo embuclado (T_{ij}^e, T_i^e).

Para considerar el recálculo de los tiempos de ciclo de cada opción productiva en cada periodo, este método introduce el concepto de holgura negativa y holgura positiva con y sin coproducción. Se considera que existe holgura positiva entre dos opciones de producción, denominadas J y N, consecutivas en la secuencia de producción, si se estima que va a haber tiempo suficiente para completar en su totalidad la cantidad de producción de la correspondiente opción productiva J. Y esto debe ocurrir antes de que los inventarios del producto o coproductos de la siguiente opción productiva, N, caigan por debajo de su correspondiente punto de relanzamiento (s). Si no existe tiempo suficiente para cumplir esta condición, se afirma que existe holgura negativa entre estas opciones productivas. En la Figura 5.4 se describe este fenómeno. En este ejemplo, se observa en Figura 5.4(b) que entre el *batch* 1 y el *batch* 2 existe holgura positiva, y entre el *batch* 3 y el *batch* 4 existe holgura negativa.

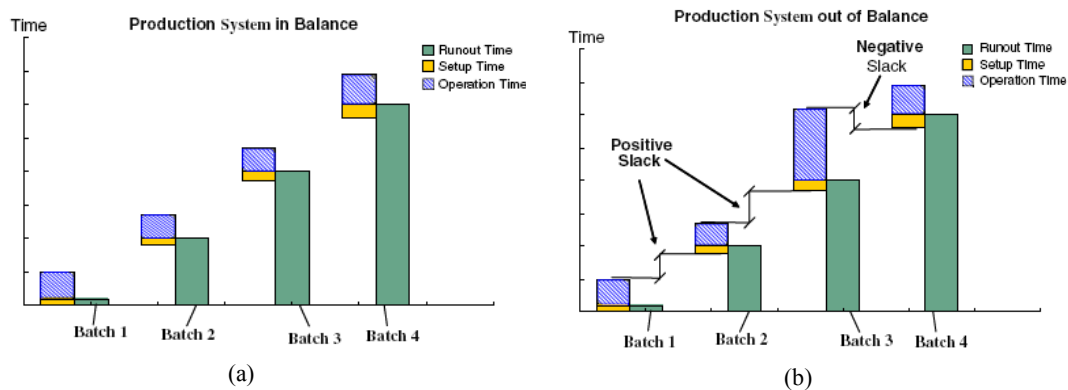


Figura 5.4. Holguras en el sistema productivo (Leven y Segerstedt, 2007) adaptación de (Leachman y Gascon, 1988)

En el caso de que la holgura total sea negativa, las longitudes de los ciclos de todos los ítems se reducen proporcionalmente, hasta las longitudes objetivo exactas, que sean necesarias para eliminar todas las holguras negativas. Estos ajustes restauran el equilibrio en el sistema productivo.

En el siguiente apartado, se traducen estas ideas en un diagrama y en unos pasos concretos de ejecución de la heurística.

5.12.1 Diagrama de la heurística

A continuación se presenta la Figura 5.5 que representa de manera esquemática la dinámica de la heurística.

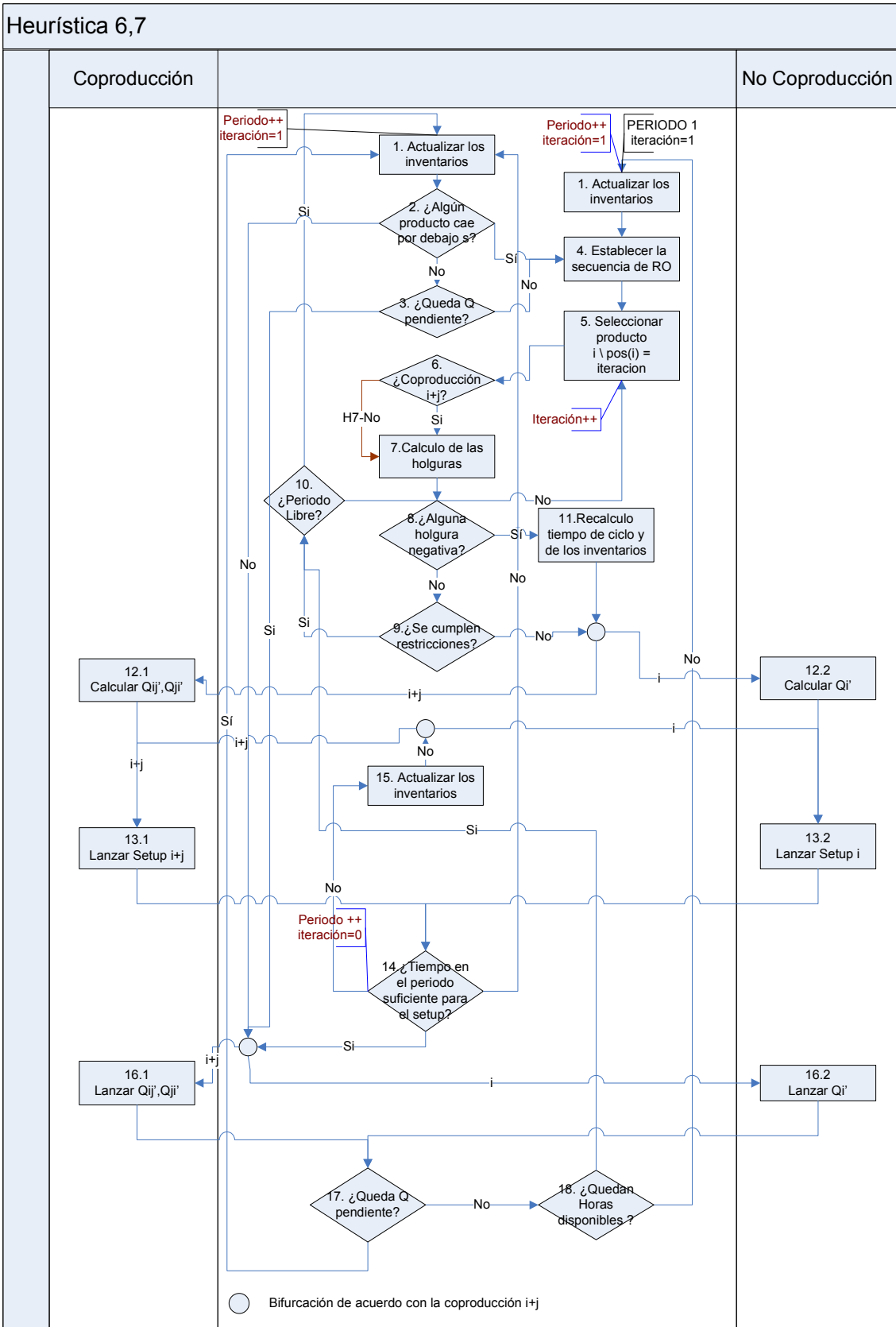


Figura 5.5 Diagrama de la dinámica de la heurística 6,7

5.12.2 Detalle de la dinámica

Los pasos empleados por la heurística son los siguientes.

Paso 1. Se actualizan los inventarios de los productos I_i , de acuerdo con sus demandas d_i y las cantidades producidas en el periodo anterior, si es que existen.

La variable iteración toma el valor 1 para ese periodo.

Paso 2. Se comprueba si el inventario de algún producto ha caído por debajo de su inventario mínimo s . En caso de que esto ocurra, se acude al paso 4 y en caso contrario, se acude al paso 3.

Paso 3. Se plantea la pregunta de si existe cantidad pendiente del anterior periodo. En caso de que si que exista, se continua la producción pendiente de acuerdo con el paso 14.1 (coproducción) o 14.2 (no coproducción). En el caso de que no exista cantidad pendiente, se acude al paso 4.

Paso 4. Se calcula el ratio de cobertura de los productos, RO_i . Los productos se ordenan de acuerdo con el valor de su ratio de cobertura, en orden creciente:

$$RO_i < RO_{i'} < RO_{i''} < \dots < RO_n \quad i, i', i'' \in \{1 \dots n\} \quad (5.56)$$

Paso 5. Se selecciona el producto a fabricar, esto es, aquel que producto i cumple $pos(i)=1$. En la primera iteración de cada periodo, siempre se va a considerar el producto que ocupa la primera posición en la secuencia de RO .

Paso 6. De acuerdo con los datos de entrada, el algoritmo *DCC-ELSP-2P* y las reglas de selección de producción, se averigua si es adecuada la coproducción para producto i junto con otro producto j o no lo es. Esto es necesario para aplicar correctamente las fórmulas del apartado 7.

Paso 7. Se calculan las holguras asociadas al reposicionamiento del resto de productos $w, w \rightarrow pos(w) > iteración$, que no son candidatos a producirse en este momento. Se obtiene restando el tiempo de *setup* y el tiempo de producción de todos los ítems que deben ser producidos antes de que el RO del ítem $w, w \rightarrow pos(w) > 1$ con su opción productiva correspondiente llegue a su tiempo de *run out*. Matemáticamente se expresa de acuerdo con (5.57). A continuación se desarrollan las fórmulas, TS_{wk} y TS_w , en (5.58).

$$TS = \begin{cases} \text{Coproducción "w+k"} \longrightarrow TS_{wk} \\ \text{No Coproducción "w"} \longrightarrow TS_w \end{cases} \quad (5.57)$$

$$\begin{aligned}
 TS_w &= TS_{wk} = \\
 &= RO_w - \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i \notin C}} c_i - \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i, j \in C}} (nc_i + mc_{ij}) - \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i \notin C}} T_{pb} k_i d_i / \rho_i - \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i, j \in C}} \left(n \frac{Q_i}{P_i} + m \frac{Q_{ij}}{P_{ij}} \right) \quad \begin{matrix} Rama(n,1) \\ Rama(1,m) \end{matrix}
 \end{aligned} \tag{5.58}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i, j \in C}} \left(n \frac{Q_i}{P_i} + m \frac{Q_{ij}}{P_{ij}} \right) \quad \begin{matrix} Rama(n,1) \\ Rama(1,m) \end{matrix} &= \left\{ \begin{array}{l} \xrightarrow{(n,1)} \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i, j \in C}} \left(n \frac{\frac{1-\tau}{n} d_i T^*}{P_i} + \frac{\tau d_i T^*}{P_{ij}} \right) \\ \xrightarrow{(1,m)} \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i, j \in C}} \left(\frac{(1-\tau) d_i T^*}{P_i} + m \frac{\tau d_i T^*}{P_{ij}} \right) \end{array} \right. =
 \end{aligned} \tag{5.59}$$

$$\begin{aligned}
 &= \left\{ \begin{array}{l} \xrightarrow{(n,1)} \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i, j \in C}} \left(\frac{(1-\tau) d_i T^*}{P_i} + \frac{\tau d_i T^*}{P_{ij}} \right) \\ \xrightarrow{(1,m)} \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i, j \in C}} \left(\frac{(1-\tau) d_i T^*}{P_i} + \frac{\tau d_i T^*}{P_{ij}} \right) \end{array} \right. = \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i, j \in C}} \left(\frac{(1-\tau) d_i T^*}{P_i} + \frac{\tau d_i T^*}{P_{ij}} \right)
 \end{aligned}$$

El desarrollo de la expresión (5.59) se presenta en

$$\sum_{\substack{pos(i)=1 \\ i,j \in C}}^{pos(i)=pos(w)-1} \left(n \frac{Q_i}{P_i} + m \frac{Q_{ij}}{P_{ij}} \right) \begin{matrix} Rama(n,1) \\ Rama(1,m) \end{matrix}$$

Destacar como:

$$m \frac{Q_{ij}}{P_{ij}} = m \frac{Q_{ji}}{P_{ij}} \quad (5.60)$$

Paso 8. Se observa el valor de las holguras. Si existe alguna holgura negativa se acude al paso 11, en caso contrario se acude al paso 9.

Paso 9. Si todas las holguras son positivas y se cumple que las restricciones que se enumeran a continuación se acude al paso 10, en caso contrario al correspondiente paso 12.

Restricciones:

- $RO_{i \rightarrow Pos(i)=1} \geq 1$ es decir, que el ratio de cobertura del producto en primera posición en la secuencia es mayor que 1.

- El ratio de cobertura del resto de productos $w, w \rightarrow pos(w) > 1$ cumple esta condición:

$$RO_w \geq (Cota\ M\ in\ Holgura) + \sum_{\substack{pos(i)=1 \\ i \notin C}}^{pos(i)=pos(w)-1} c_i + \sum_{\substack{pos(i)=1 \\ i,j \in C}}^{pos(i)=pos(w)-1} (nc_i + mc_{ij}) + \sum_{\substack{pos(i)=1 \\ i \notin C}}^{pos(i)=pos(w)-1} T_{pb} k_i d_i / \rho_i + \sum_{\substack{pos(i)=1 \\ i,j \in C}}^{pos(i)=pos(w)-1} \left(n \frac{Q_i}{P_i} + m \frac{Q_{ij}}{P_{ij}} \right) \begin{matrix} Rama(n,1) \\ Rama(1,m) \end{matrix} \quad (5.61)$$

Donde la cota de la holgura mínima, *Cota Min Holgura*, es un parámetro que viene definido de acuerdo con la combinación empleada como entrada. Esta fórmula es equivalente a:

$$TS_w \geq Cota\ M\ in\ Holgura \cup TS_{wk} \geq Cota\ M\ in\ Holgura \quad (5.62)$$

Paso 10. De acuerdo con la combinación de los parámetros de entrada se resuelve:

- Si es adecuado tomarse un periodo libre que implica la inicialización a 1 de la variable iteración, así como el incremento de la variable periodo (paso 1)

- Si no es adecuado tomarse un periodo libre que implica la inicialización el incremento en una unidad de la variable iteración (paso 5)

Paso 11. Si alguna de las holguras es negativa, los tiempos de ciclo no pueden mantenerse. Para resolver la infactibilidad, el tiempo de ciclo se reduce de forma que todas las holguras sean positivas, esto es:

$$TS_w \geq 0 \cup TS_{wk} \geq 0 \tag{5.63}$$

Para conseguir esto, el nuevo tiempo de ciclo, T_{op} denominado tiempo de ciclo operativo se calcula del siguiente modo (5.64) y (5.65).

$$T_{op} = \alpha T_{pb} \tag{5.64}$$

$$\alpha = \min \left\{ 1, \min_w \frac{RO_w - \sum_{\substack{pos(i)=1 \\ i \notin C}}^{pos(i)=pos(w)-1} c_i + \sum_{\substack{pos(i)=1 \\ i, j \in C}}^{pos(i)=pos(w)-1} (nc_i + mc_{ij})}{\sum_{\substack{pos(i)=1 \\ i \notin C}}^{pos(i)=pos(w)-1} T_{pb} k_i d_i / \rho_i + \sum_{\substack{pos(i)=1 \\ i, j \in C}}^{pos(i)=pos(w)-1} \left(n \frac{Q_i}{P_i} + m \frac{Q_{ij}}{P_{ij}} \right)} \right\} \tag{5.65}$$

Rama(n,1)
Rama(1,m)

Matemáticamente, puede ocurrir que el tiempo operativo resulte ser demasiado pequeño e incluso negativo (si los pedidos retrasados son inevitables). Si esto ocurre debe modificarse. Se establece un parámetro de entrada al sistema denominado f , que especifica la longitud mínima de un ciclo productivo, y que permite determinar cuando un ciclo es demasiado pequeño ($< fp_1/k_1d_1$). La fórmula definitiva del tiempo operativo con coproducción resulta de acuerdo con (5.66) y (5.67).

El valor de esta corrección del tiempo operativo planteada en (Gascon et al., 1994) no es empleada en la heurística de (Soman et al., 2006) o por lo menos no es indicada en el artículo. En (Soman et al., 2006) solo se indica no se quiere disponer de ciclos mas cortos que una determinada cantidad, lo que hace que las cantidades suban hasta alcanzar ese mínimo. Como curiosidad comentar que al escribir el artículo original (Leachman y Gascon, 1988) cometió un error tipográfico en la fórmula, al colocar incorrectamente un paréntesis. Graciosamente este error es hereditario (Soman et al., 2006).

$$T_{op} = \alpha T_{pb} \tag{5.66}$$

$$\alpha = \max \left[f \left(n \frac{p_{ij}}{Q_{ij}} + m \frac{p_i}{Q_i} \right)_{\substack{i \rightarrow \text{pos}(i)=1 \\ j \rightarrow \text{coproducto } i}}, \min \left\{ 1, \min_w \frac{RO_w - \sum_{\substack{\text{pos}(i)=1 \\ i \notin C}}^{\text{pos}(i)=\text{pos}(w)-1}} c_i + \sum_{\substack{\text{pos}(i)=1 \\ i, j \in C}}^{\text{pos}(i)=\text{pos}(w)-1}} (nc_i + mc_{ij})}{\sum_{\substack{\text{pos}(i)=1 \\ i \notin C}}^{\text{pos}(i)=\text{pos}(w)-1}} T_{pb} k_i d_i / \rho_i + \sum_{\substack{\text{pos}(i)=1 \\ i, j \in C}}^{\text{pos}(i)=\text{pos}(w)-1}} \left(m \frac{Q_{ij}}{p_{ij}} + n \frac{Q_i}{p_i} \right)} \right\} \right] \tag{5.67}$$

Rama(n,1)
Rama(1,m)

Así con el valor de este nuevo tiempo operativo, T_{op} , se calcula el nuevo tiempo de ciclo de acuerdo con (5.68):

$$T^e = \begin{cases} \text{Coproducción "i + j"} \longrightarrow T^e = T_{ij}^e = T_{op} k_{ij} \\ \text{No Coproducción "i"} \longrightarrow T_i^e = T_{op} k_i \end{cases} \quad (5.68)$$

Con este nuevo tiempo de ciclo se deberán recalculan todos los parámetros asociados, como se describe en el paso siguiente (paso 11).

Paso 11. Se recalculan los parámetros asociados al tiempo de ciclo, esto es, los inventario de seguridad ss , y los niveles mínimos s y máximos S de producción para todas las opciones productivas de acuerdo con las fórmulas descritas en el apartado 5.4.4 y 5.4.5.

Paso 12.1. Se calcula la cantidad a producir de los productos i y j cuando se producen conjuntos. Es decir, Q_{ij} (cantidad de producto i a producir cuando se coproduce con j) y Q_{ji} (cantidad de producto j a producir cuando se coproduce con i). Para esto, se consideran los niveles máximos a alcanzar para cada producto, esto es, S y los inventarios actuales I . A partir de esto, se busca el parámetro común durante el proceso de fabricación de i con j que es el tiempo de fabricación t_{ij} :

$$\left. \begin{aligned} t_{ij} &= \frac{S_{ij} - I_i}{p_{ij}} \\ t_{ji} &= \frac{S_{ji} - I_j}{p_{ji}} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \begin{cases} t'_{ij} = \min(t_{ij}, t_{ji}) \rightarrow \\ t_{ij} = \min(t'_{ij}, \text{uds de tiempo disponible en el periodo}) \end{cases} \quad (5.69)$$

Como la dinámica de esta heurística se repite cada periodo, es necesario incluir la rectificación de las unidades de tiempo disponibles en ese periodo. Estas unidades de tiempo disponibles en el periodo, se obtienen descontando al tiempo real el tiempo de *setup* del proceso.

En el caso de que el tiempo disponible para la fabricación t_{ij} tenga un valor negativo se iguala a cero. Esto es, porque en el periodo no existe tiempo suficiente para el *setup* del proceso.

$$\begin{aligned} Q_{ij}^t &= t_{ij} p_{ij} \\ Q_{ji}^t &= t_{ji} p_{ji} \end{aligned} \quad (5.70)$$

La cantidad a fabricar en el siguiente periodo si es que existe se va a denominar a partir de este momento cantidad pendiente y sería la siguiente.

$$\begin{aligned} Q_{ij}^{t+1} &= t'_{ij} p_{ij} - Q_{ij}^t \\ Q_{ji}^{t+1} &= t'_{ji} p_{ji} - Q_{ji}^t \end{aligned} \quad (5.71)$$

Paso 12.2. Se calcula la cantidad a producir del producto i , es decir Q_i , cuando se produce de manera aislada. Para esto se consideran los niveles máximos a alcanzar por el producto, esto es, S y los inventarios actuales I . Para el cálculo de Q_i , se considera el tiempo disponible en el periodo para fabricar. Este tiempo para fabricar, se obtiene descontando al tiempo real el tiempo de *setup* del proceso.

$$t'_i = \frac{S_i - I_i}{p_i} \rightarrow t_i = \min(t'_i, \text{uds de tiempo disponible en el periodo}) \quad (5.72)$$

En el caso de que el tiempo disponible para la fabricación t_i tenga un valor negativo se iguala a cero. Esto es, porque en el periodo no existe tiempo suficiente para el *setup* del proceso.

Se puede calcular la cantidad a producir del producto en ese periodo (5.73):

$$Q_i^t = t_i p_i \quad (5.73)$$

La cantidad a fabricar en el siguiente periodo, si es que existe, se va a denominar cantidad pendiente y sería la siguiente (5.74):

$$Q_i^{t+1} = t'_i p_i - Q_i^t \quad (5.74)$$

Paso 13.1. Se lanza el *setup* de la opción productiva de coproducción.

Paso 13.2. Se lanza el *setup* de la opción productiva de no coproducción.

Paso 14. Se comprueba si existe tiempo suficiente en el periodo para la realización del *setup* completo. En caso de que se quede a mitad en un periodo, se continúa en el siguiente, de modo que el periodo se incrementa en una unidad (paso 15). En caso de que exista tiempo suficiente el siguiente paso es el 16.1 (coproducción) o el 16.2 (no coproducción).

Paso 15. Se actualizan los inventarios de los productos I_i de acuerdo con sus demandas d_i y las cantidades producidas en el periodo anterior, si es que existen.

Paso 16.1. Se lanza la fabricación de la opción productiva de coproducción.

Paso 16.2. Se lanza fabricación de la opción productiva de no coproducción.

Paso 17. El sistema se pregunta si la cantidad pendiente a fabricar de acuerdo con el paso 7.1 (coproducción) o el paso 7.2 (no coproducción) es mayor que 0, esto es (5.75):

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{ij}^{t+1}(\text{coproducción}) \\ Q_i^{t+1}(\text{no coproducción}) \end{array} \right\} > 0 \quad (5.75)$$

Paso 18. En caso de que no exista cantidad pendiente y exista tiempo disponible en ese periodo, se vuelve al paso 10, para revisar la consideración del periodo libre.

En caso de que no exista cantidad pendiente y no existan horas disponibles en el periodo, se vuelve al paso 1 que implica un salto de periodo y una inicialización de la variable iteración a 1.

5.13 Heurística 7

Esta heurística resulta similar a la anterior aunque difiere en el modo del recálculo del tiempo de ciclo. De acuerdo con el detalle de la heurística, esto se contempla en los pasos 7,8,9 por lo que se detallan a continuación. El diagrama de la heurística es el que se refleja en la Figura 5.5.

Este método emplea los mismos conceptos de niveles de inventarios mínimos y máximos contemplados en el apartado 5.4.5, siendo considerado en este caso un tiempo de ciclo empujado, por tanto en las fórmulas descritas se debe considerar que el valor de T^* y T_i esta empujado, esto es, T_{ij}^e, T_i^e .

5.13.1 Detalle de la dinámica

Paso 7. Se calculan las holguras asociadas al reposicionamiento del resto de productos $w, w \rightarrow pos(w) > 1$. En esta heurística, independientemente de que exista coproducción o no, el modo de cálculo de las holguras es equivalente, concretamente se calcula por producto. Se obtiene restando el tiempo de *setup* y el tiempo de producción de todos los ítems que deben ser producidos antes de que el ítem w con su opción productiva de correspondiente llegue a su tiempo de *run out*. Matemáticamente se expresa de acuerdo con (5.76).

$$TS_w = RO_w - \sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} c_i - \sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} T_{pb} k_i d_i / \rho_i \quad (5.76)$$

Una vez calculadas las holguras de todos los productos, si alguna de las holguras es negativa, se continúa con el paso 9, si todas son positivas se pasa al paso 8.

Paso 8. Se observa el valor de las holguras. Si existe alguna holgura negativa se acude al paso 11, en caso contrario se acude al paso 9.

Paso 9. Si todas las holguras son positivas y se cumple que las restricciones que se enumeran a continuación, se acude al paso 10, en caso contrario al correspondiente paso 12.

Restricciones:

- $RO_{i \rightarrow Pos(i)=iteración} \geq 1$ es decir, que el ratio de cobertura del producto a producir, de acuerdo con su posición en la secuencia, es mayor que 1. Si un periodo no tiene más de una iteración, siempre será el producto en primera posición.

- El ratio de cobertura del resto de productos $w, w \rightarrow pos(w) > iteración$ cumple esta condición:

$$RO_w \geq (Cota\ Min\ Holgura) + \sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} c_i + \sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} T_{pb} k_i d_i / p_i \quad (5.77)$$

Donde la cota mínima de la holgura es un parámetro que viene definido de acuerdo con la combinación empleada como entrada. Esta fórmula es equivalente a:

$$TS_w \geq Cota\ Min\ Holgura \quad (5.78)$$

Paso 10. De acuerdo con la combinación de los parámetros de entrada se resuelve:

- Si es adecuado tomarse un periodo libre, que implica la inicialización a 1 de la variable iteración, así como el incremento de la variable periodo (paso 1)
- Si no es adecuado tomarse un periodo libre, que implica la inicialización el incremento en una unidad de la variable iteración (paso 5)

Paso 11. Si alguna de las holguras es negativa, los tiempos de ciclo no pueden mantenerse. Para resolver la infactibilidad, el tiempo de ciclo se reduce de forma que todas las holguras sean positivas, esto es:

$$TS_w \geq 0 \quad (5.79)$$

Para conseguir esto, el nuevo tiempo de ciclo, T_{op} denominado tiempo de ciclo operativo se calcula del siguiente modo:

$$T_{op} = \alpha T_{pb} \quad (5.80)$$

$$\alpha = \min \left\{ 1, \min_w \frac{RO_w - \sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} c_i}{\sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} k_i d_i / \rho_i} \right\} \quad (5.81)$$

Matemáticamente puede ocurrir que el tiempo operativo resulte ser demasiado pequeño e incluso negativo (si los pedidos retrasados son inevitables). Si esto ocurre debe modificarse. Así se establece un parámetro de entrada al sistema denominado f que especifica la longitud mínima de un ciclo productivo, y que permite determinar cuando un ciclo es demasiado pequeño ($< fp_1/k_1 d_1$). Así, la formula definitiva del tiempo operativo resulta:

$$T_{op} = \alpha T_{pb} \quad (5.82)$$

$$\alpha = \max \left[\left(\frac{fp_i}{T_{pb} k_i d_i} \right)_{i \rightarrow pos(i)=1} \right], \min \left\{ 1, \min_w \frac{RO_w - \sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} c_i}{\sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} T_{pb} k_i d_i / \rho_i} \right\} \quad (5.83)$$

Este nuevo tiempo operativo implica un recálculo de los tiempos de ciclo, de acuerdo con:

$$T^e = \begin{cases} \text{Coproducción "i + j"} \longrightarrow T^e = T_{ij}^e = T_{op} k_{ij} \\ \text{No Coproducción "i"} \longrightarrow T_i^e = T_{op} k_i \end{cases} \quad (5.84)$$

Con este nuevo tiempo de ciclo se recalculan todos los parámetros asociados.

5.14 Heurística 8

Esta heurística aprovecha la idea planteada en (Fransoo, 1993) y ya comentada en el desarrollo de la heurística 3. Se pretende establecer patrones de producción cíclicos lo más largos posibles, sin controlar en exceso la situación de los productos que no se están fabricando en ese momento. En la heurística 6, se plantea un recálculo de los tiempos de ciclo de los productos para adaptarse a la situación real, y eliminar así cualquier posible holgura negativa, esto es, tiempo insuficiente para completar hasta su nivel máximo la cantidad a producir de dos opciones productivas consecutivas. Parece lógico intentar mantener el máximo tiempo posible los nuevos tiempos de ciclos calculados por la heurística, pues se han

calculado reconsiderado la situación de todos los ítems en ese momento concreto. Esto se puede conseguir permitiendo que se fabrique las cantidades hasta llegar a su nivel máximo (Fransoo, 1993).

La heurística 8 presenta por tanto una simplificación sobre la heurística 6, pues no se considera la situación de inventarios del resto de productos (*no preemptive*). De este modo, una vez lanzada una orden de fabricación se ejecuta hasta que está completa.

Este método emplea los mismos conceptos de niveles de inventarios mínimos y máximos contemplados en el apartado 5.4.5. En este caso, se considera un tiempo de ciclo empujado, por tanto en las fórmulas descritas se debe considerar que el valor de T^* y T_i está empujado, esto es, T_{ij}^e, T_i^e .

En el siguiente apartado, se traducen estas ideas en un diagrama Figura 5.6. Respecto a los pasos concretos de ejecución de la heurística, al tratarse de una modificación de la heurística 6, se considera adecuado establecer una tabla que muestra la equivalencia entre pasos para ambas heurísticas Tabla 5.2.

5.14.1 Diagrama de la heurística

A continuación se presenta la Figura 5.6 que representa de manera esquemática la dinámica de la heurística.

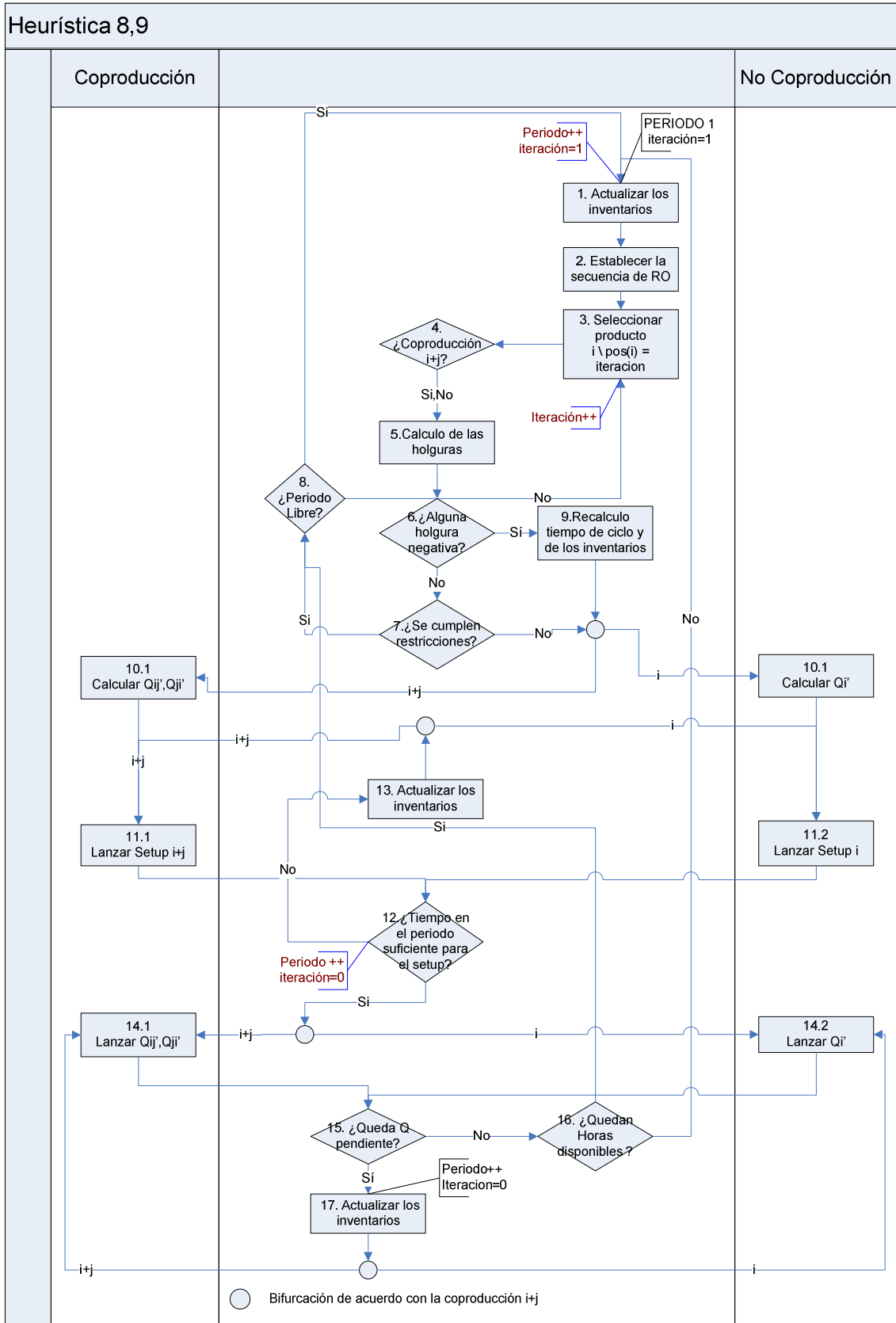


Figura 5.6 Diagrama de la dinámica de la heurística 8,9

5.14.2 Detalle de la dinámica

Los pasos empleados por esta heurística se enumeran en la Tabla 5.2 en la que se presenta su equivalencia con la heurística 8.

Tabla 5.2 Equivalencia entre pasos de las heurísticas 6 y 8

Heurística 6	Heurística 8
1	1
4	2
5	3
6	4
7	5
8	6
9	7
10	8
11	9
12.1-12.2	10.1-10.2
13.1-13.2	11.1-11.2
14	12
15	13
16.1-16.2	14.1-14.2
17	15
18	16
1	17

5.15 Heurística 9

Esta heurística introduce en la heurística 7 la idea planteada en (Fransoo, 1993) ya comentada, de intentar establecer patrones de producción cíclicos lo más largos posibles, sin controlar en exceso la situación de los productos que no se están fabricando en ese momento.

La heurística 9 presenta por tanto una simplificación sobre la heurística 7, pues no se considera la situación de inventarios del resto de productos (*no preemptive*), puesto que, una vez lanzada una orden de fabricación se ejecuta hasta que está completa.

Este método emplea los mismos conceptos de niveles de inventarios mínimos y máximos contemplados en el apartado 5.4.5. En este caso se considera un tiempo de ciclo embudado, por tanto en las fórmulas descritas se debe considerar que el valor de T^* y T_i , es, T_{ij}^e, T_i^e .

El diagrama de la heurística es el que aparece en la Figura 5.6. Respecto a los pasos concretos de ejecución de la heurística, al tratarse de una modificación de la heurística 7 se considera adecuado establecer una tabla que muestra la equivalencia entre pasos para ambas heurísticas Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Equivalencia entre pasos de las heurísticas 7 y 9

Heurística 7	Heurística 9
Paso 1	Paso 1
4	2
5	3
6	4
7	5
8	6
9	7
10	8
11	9
12.1-12.2	10.1-10.2
13.1-13.2	11.1-11.2
14	12
15	13
16.1-16.2	14.1-14.2
17	15
18	16
1	17

5.16 Conclusiones

En este apartado se han descrito las heurísticas creadas para modelar el fenómeno de coproducción en el entorno del problema de programación del lote económico. Algunas de las heurísticas planteadas pueden resultar sencillas y mientras que otras son más elaboradas y complejas. Estas heurísticas permiten responder a las preguntas de qué fabricar, cómo fabricar y cuanto fabricar de los distintos productos con su opción productiva. Se han descrito las posibles variantes de las mismas, cuya eficiencia y eficacia será testada a través de la simulación. El diseño de la misma se describe en el siguiente capítulo 6, y los resultados se mostraran en el capítulo 7.

Capítulo 6

Propósito y Diseño de la Experimentación

6.1 Introducción

En este capítulo se describe el propósito y diseño de la experimentación que va permitir la evaluación de las nueve heurísticas y sus posibles combinaciones de parámetros en distintos escenarios.

6.2 Propósito del Experimento

En el capítulo anterior, se han descrito una serie de heurísticas diseñadas para el problema *DCC-ELSP-2P* en un entorno multi-ítem. Las heurísticas descritas disponen de una serie de parámetros de diseño, que pueden tener distintos valores. Para evaluar el rendimiento de estas heurísticas, con las distintas combinaciones de parámetros y analizar si son capaces de modelar adecuadamente el fenómeno de coproducción, se realiza esta experimentación. De este modo, es necesario que la experimentación contemple una gran variedad de combinaciones de parámetros en distintas situaciones, tal y como, se detallará en los siguientes apartados.

6.3 Datos de Entrada

6.3.1 Productos

Se emplea el conjunto de datos Bomberger (Bomberger, 1966) que aparece en la Tabla 6.1, pues es el *benchmark* más comúnmente empleado en la literatura del *ELSP*. Sin embargo, para incorporar el fenómeno de coproducción deliberada y controlada, es necesario modificar los datos ligeramente como muestra la Tabla 6.2 siguiendo la misma línea (Soman et al., 2006) que modificó este *benchmark*, para incorporar la demanda de productos bajo pedido en su modelo.

Tabla 6.1. Datos de Bomberger (ratio de utilización 88%)

Producto	Coste de Setup	Coste Unitario*	Ratio de Producción (ud/día)	Demanda (ud/día)	Tiempo Setup (horas)
1	15	0,065	30.000	400	1
2	20	0,1775	8.000	400	1
3	30	0,1275	9.500	800	2
4	10	0,1	7.500	1.600	1
5	110	2,785	2.000	80	4
6	50	0,2675	6.000	80	2
7	310	1,5	2.400	24	8
8	130	5,9	1.300	340	4
9	200	0,9	2.000	340	6
10	5	0,04	15.000	400	1

Para incorporar la coproducción deliberada y controlada, se decide incorporar dos parejas de coproductos, resultando un sistema multi-ítem mixto en el que el 40% de los productos pueden coproducirse.

Tabla 6.2. Datos de Bomberger modificados con coproducción (ratio de utilización 88%)

Opción Productiva	Producto	Coste de Setup	Coste Unitario	Ratio de Producción (ud/día)	Demanda (ud/día)	Tiempo Setup (horas)				
1	1	15	0,065	30000	400	1				
2	2	20	0,1775	8000	400	1				
3	3	30	0,1275	9500	800	2				
2+3	2	3	30	0,1775	4000	4750	400	800	1,5	
4	4	10	0,1	7500	1600	1				
5	5	110	2,785	2000	80	4				
6	6	50	0,2675	6000	80	2				
5+6	5	6	110	2,785	0,2675	1000	3000	80	80	3
7	7	310	1,5	2400	24	8				
8	8	130	5,9	1300	340	4				
9	9	200	0,9	2000	340	6				
10	10	5	0,04	15000	400	1				

En la Tabla 6.2 se observa como los coproductos son: el producto 2, que puede coproducirse con el producto 3 y el producto 5, que puede coproducirse con el producto 3 con el producto 6. Para estos coproductos, se asume que el ratio de coproducción de cada uno es la mitad de su ratio de producción independiente. Respecto al coste y al tiempo de *setup*, se asume que cuando hay coproducción es el máximo de los costes y tiempos de *setup* de cada producto fabricado de manera aislada. Respecto al coste de inventario, se asume un 10% del coste unitario anual de cada producto. Los años se consideran de 240 días, con 8 horas de jornada laboral. Las pérdidas de ventas de cada producto se asumen un 10% del coste unitario.

Se escogen estas parejas de coproductos 2, 3 y 5, 6 por varios motivos. En primer lugar, porque como se describe y detalla más adelante (Tabla 6.3), las características de costes, tiempos, demanda y ratios de producción de las parejas de coproductos no son equivalentes. En segundo lugar porque de acuerdo con el modelo propuesto en el capítulo 4, teóricamente su coproducción supone una ventaja en costes sobre la no coproducción, tal y como, se muestra en la Tabla 6.4. Señalar que existen más productos de la Tabla 6.1 que cumplen estas hipótesis, y que en este punto el azar juega un papel importante.

Como se ha comentado, en la Tabla 6.3 se analizan las características de los coproductos. Se examinan las relaciones entre los costes y tiempos de *setup*, los costes unitarios, la demanda y el ratio de producción para los dos productos, i y j (3 y 2, 5 y 6), que son candidatos a ser coproducidos. Por ejemplo, en la segunda línea, el valor de -33,33 indica que los costes de *setup* del producto 2 son 33,33% más bajos que los del producto 3. También examinamos los costes y tiempos de *setup*, los costes unitarios, la demanda y el ratio de producción del producto i y de su correspondiente opción productiva, $i+j$. Por ejemplo, el valor de 50 en la segunda línea indica que los costes de *setup* del producto 2, son un 50% inferior a los de la coproducción de 2 y 3.

Tabla 6.3. Relaciones Coproductos

	Prod	Coste <i>Setup</i>			Coste Unitario		Ratio de Producción			Demanda		Tiempo de <i>setup</i>		
		A_i	% A_i/A_j	% A_i/A_{ij}	u_i	% u_i/u_j	p_i	% p_i/p_j	% p_i/p_{ij}	d_i	% d_i/d_j	c_i	% c_i/c_j	% c_i/c_{ij}
3	i	30	50,00	0	0,1275	-28,17	9.500	18,75	-50	800	100	2	100	0
2	j	20	-33,33	50	0,1775	39,22	8.000	-15,79	-50	400	-50	1	-50	100
	i	j	A_{ij}		u_i	u_j	p_{ij}	p_{ji}		d_i	d_j	c_{ij}		
2+3	2	3	30		0,1775	0,1275	4.750	4.000		800	400	2		
	i	A_i	% A_i/A_j	% A_i/A_{ij}	u_i	% u_i/u_j	p_i	% p_i/p_j	% p_i/p_{ij}	d_i	% d_i/d_j	c_i	% c_i/c_j	% c_i/c_{ij}
5	i	110	120,00	0	2,785	941,12	2.000	-66,67	-50	80		4	100	0
6	j	50	-54,55	120	0,2675	-90,39	6.000	200,00	-50	80		2	-50	100
	i	j	A_{ij}		u_i	u_j	p_{ij}	p_{ji}		d_i	d_j	c_{ij}		
5+6	5	6	110		2,785	0,2675	1.000	3.000		80	80	4		

En la Tabla 6.4 se muestra de acuerdo con la aplicación del algoritmo *DCC-ELSP-2P* la combinación (n,m,T) que permite unos menores costes de coproducción. También se muestra el valor correspondiente a la no coproducción de estos productos de acuerdo con la fórmula *Economic Manufacturing Quantity - Emq* (Harris, 1913). Se observa como emplear la coproducción deliberada y controlada para la pareja 2 y 3 supone un ahorro en costes del 9.72%. Para la pareja 5 y 6 este ahorro es de un 6.7%. Destacar como la tabla muestra de cada pareja de coproductos quién sería el producto i o j de acuerdo con lo comentado en el capítulo 5. Recordar que el coproducto i debía tener un valor de velocidad relativa de consumo (d_i/p_{ij}) mayor que el coproducto j (d_j/p_{ji}) .

Tabla 6.4. Ahorro en costes al coproducir 3 y 2, 5 y 6 (ratio de utilización 88%)

Caso	Ítem	Entrada		Resultados		
		n	m	T	Costes	ΔEmq
1	3 i	1	1	51,35	2,34	9,72%
	2 j				<i>Emq</i>	
2	5 i	2	1	131,84	5,01	6,70%
	6 j				<i>Emq</i>	

En las figuras siguientes, se muestran las graficas de la evolución de los costes totales frente a los valores de (n,m) para $(n \geq 1, m=1)$ y $(n=1, m \geq 1)$ para las dos parejas de coproductos. El caso 1, de acuerdo con la Tabla 6.4, se compone de los coproductos 3 y 2 y su gráfico de costes es la Figura 6.1(a). El caso 2, está formado por los coproductos 5 y 6 y aparece en la Figura 6.1(b). En cada una de las gráficas aparecen dos líneas: la línea recta representa los costes de producir de forma independiente los productos (*EMQ*) y la línea curva representa los costes de coproducción de acuerdo con la combinación (n,m) .

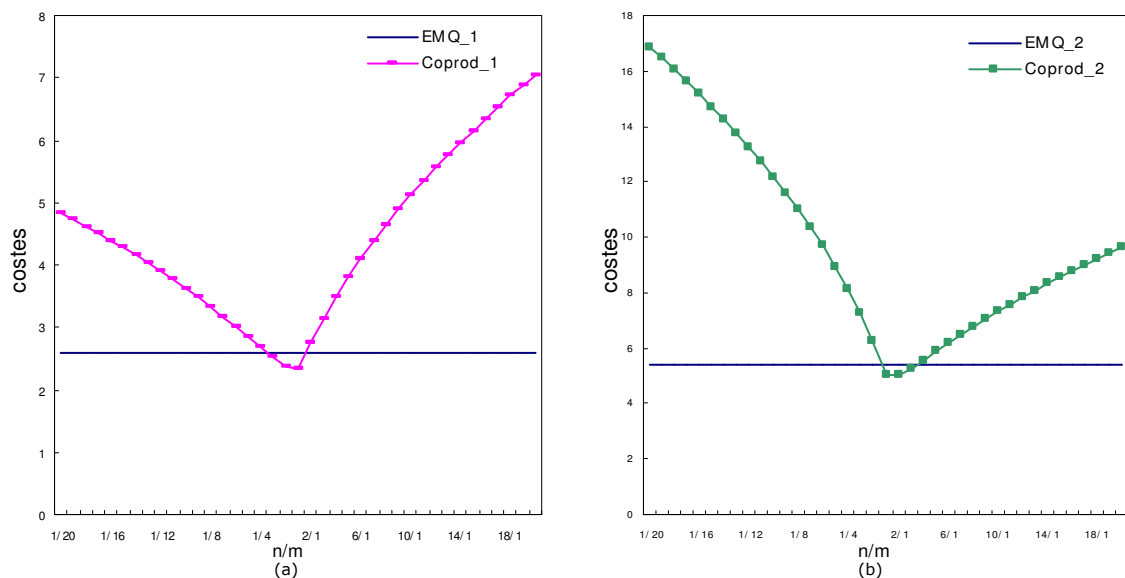


Figura 6.1 Evolución de costes para el sistema al 88% en función de la combinación (n,m) para el caso: (a) 2 y 3 (b) 5 y 6

En la Figura 6.1 se observa cómo tanto para los coproductos 2 y 3, como para 5 y 6 existen varias combinaciones de (n,m) para las que resulta más barato coproducir que no coproducir. La combinación (n,m) más económica es $(1,1)$ en el caso de 2 y 3 y $(2,1)$ en el caso de 5 y 6. En ambas gráficas, se observa un ligero achatamiento de la gráfica en la zona cercana al óptimo. Esto es así, puesto que es posible que el óptimo real, se encuentre con una combinación (n,m) que este fuera de la restricción impuesta en la resolución del modelo *DCC-ELSP-2P*, que implica que $(n \geq 1, m = 1)$ y $(n = 1, m \geq 1)$. Sin embargo, esta suposición tal y como se argumenta en el capítulo 4 es adecuada, ya que como se aprecia en las gráficas, el óptimo (n,m) se encontraría muy cercano en costes al alcanzado con la restricción $(n \geq 1, m = 1)$ y $(n = 1, m \geq 1)$.

6.3.2 Demanda

En el problema clásico del *ELSP* supone una demanda determinista para los productos. Sobre esta suposición, se plantean los modos clásicos de cálculo del tamaño de lote. Sin embargo, en la mayor parte de las situaciones reales, esto no se cumple. En esta tesis, se considera una demanda estocástica o probabilística, concretamente estacionaria. Se asume tal y como hizo (Brander et al., 2005; Soman et al., 2006) que la demanda sigue una distribución normal, con un coeficientes de variación de 0.1.

6.3.3 Utilización del Sistema

Resulta adecuado observar el comportamiento de las heurísticas, en sistemas sometidos a distintos niveles de utilización. Para ello, es necesario modificar de nuevo los datos iniciales de Bomberger y crear distintos escenarios. Estos datos iniciales, como ya se ha comentado, consideraban una utilización alta, del 88%. Siguiendo a (Goncalves et al., 1994) se plantea un sistema con una utilización baja y una utilización media. Se modifica la utilización del sistema a partir de la variación del ratio de utilización de acuerdo con (Oner y Bilgic, 2008), tal y como, se muestra en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5. Datos de Bomberger distintas utilizations

Producto	Demanda d_i	Baja Utilización (44%)		Media Utilización (66%)		Alta Utilización (88%)	
		p_i	d_i/p_i	p_i	d_i/p_i	p_i	d_i/p_i
1	400	55.000	0,007	40.000	0,010	30.000	0,013
2	400	14.000	0,029	14.000	0,029	8.000	0,050
3	800	18.000	0,044	12.000	0,067	9.500	0,084
4	1600	16.200	0,099	10.000	0,160	7.500	0,213
5	80	5.000	0,016	3.000	0,027	2.000	0,040
6	80	12.000	0,007	12.000	0,007	6.000	0,013
7	24	5.000	0,005	4.000	0,006	2.400	0,010
8	340	2.600	0,131	2.000	0,170	1.300	0,262
9	340	4.000	0,085	2.000	0,170	2.000	0,170
10	400	20.000	0,020	25.000	0,016	15.000	0,027
		Utilización	0,442	Utilización	0,661	Utilización	0,882

Para estos nuevos escenarios, es necesario replantear el algoritmo *DCC-ELSP-2P* y obtener las nuevas combinaciones (n,m,T) que permiten unos menores costes de coproducción. En la Tabla 6.6 se muestran estos resultados para el escenario del 44% y en la Tabla 6.7 para el escenario del 66%. Se observa como coproducir las parejas 2,3 y 5,6 sigue suponiendo un ahorro en costes respecto a no coproducir. Este ahorro, es ligeramente inferior que en el caso del 88% para las parejas 2 y 3, mientras que para 5 y 6 el mayor ahorro se encuentra en el sistema con la utilización baja (8.91%).

Tabla 6.6. Ahorro en costes al coproducir 3 y 2, 5 y 6 (ratio de utilización 44%)

Caso	Ítem	Entrada		Resultados			
		n	m	T	Costes	$\blacktriangle Emq$	
1	3 i	Coproducción	1	2	75,10552	2,396628	8,98%
	2 j	Emq				2,633141	
2	5 i	Coproducción	1	1	89,05285	4,940886	8,91%
	6 j	Emq				5,424047	

Tabla 6.7. Ahorro en costes al coproducir 3 y 2, 5 y 6 (ratio de utilización 66%)

Caso	Ítem	Entrada		Resultados			
		n	m	T	Costes	$\blacktriangle Emq$	
1	3 i	Coproducción	1	1	50,20408	2,390244	8,59%
	2 j	Emq				2,614883	
2	5 i	Coproducción	2	1	128,931	5,119017	5,20%
	6 j	Emq				5,399683	

En la Figura A.1 y la Figura A.2 de los anexos, se presentan las gráficas de la evolución de los costes totales frente a los valores de (n,m) para $(n \geq 1, m=1)$ y $(n=1, m \geq 1)$ para las dos parejas de coproductos, con una utilización baja y media

del sistema, respectivamente. En estas figuras, se observa tal y como aparecía para el ambiente de utilización del 88%, que para los coproductos 2,3 y 5,6 existen varias combinaciones de (n,m) para las que resulta más barato coproducir que no coproducir.

6.3.4 Inventarios Iniciales

En las diferentes heurísticas se van a considerar unos valores para los inventarios iniciales del 40% del valor de los inventarios máximos. Es curioso, que aunque existen heurísticas muy sensibles al valor de los inventarios iniciales, en la mayoría de artículos revisados sobre simulación de heurísticas, el valor de este inventario no aparece explícitamente (Soman et al., 2006). En (Gascon et al., 1994) se comenta que los inventarios iniciales se establecen suficientemente altos, de modo que se quiere evaluar cómo responden todas las heurísticas con exceso de inventarios iniciales frente a las pruebas para demandas estocásticas estacionarias. Pero en el caso de demandas estocásticas no estacionarias (Gascon et al., 1994) se plantean bajos niveles de inventarios iniciales. Destaca el trabajo (Brander et al., 2005) en el que se indican específicamente unos inventarios iniciales.

Tabla 6.8. Inventarios Iniciales

Producto	Inventario Inicial
1	26.807
2	5.912
3	11.903
4	10.326
5	1.579
6	3.428
7	1.974
8	2.217
9	7.202
10	6.297

En la siguiente Tabla 6.8 se presenta un resumen de las condiciones del experimento presentadas hasta el momento.

Tabla 6.9. Resumen Condiciones del Experimento

Nº Productos	Nº Parejas	PA	PB	PA1	PB1	Inventarios Iniciales	CV Dem	Nº Días	Ratio Coproducción	Setup
10	2	2	3	5	6	40% InventarioMaximo	0,1	240	Pi/2	Max

6.4 Parámetros de Diseño del Experimento

6.4.1 Horizonte

Se van a considerar un horizonte de 960 días como se emplea en (Brander et al., 2005). Los horizontes en los artículos de simulación revisados son muy dispersos. Resulta de nuevo curioso que se simulen hasta 30000 días heurísticas que en la práctica deben tener cierta estabilidad en el corto plazo (Soman et al., 2006).

6.4.2 Ratio de Cobertura

El ratio de cobertura o *run out* es un concepto muy empleado en la realidad industrial, que hace referencia a las unidades de tiempo de demanda de las que se dispone en inventario. Existen modos más o menos completos para definirlo. En esta simulación se consideran tres modos de cálculo de RO.

El modo de cálculo del RO nº1 indicado como $RO=1$, es el más intuitivo (Gascon et al., 1994; Soman et al., 2006) y es el siguiente, con I_i el inventario actual de un producto y d_i su demanda.

$$RO = 1 \rightarrow RO_i = \frac{I_i}{d_i} \quad (6.1)$$

El modo de cálculo del RO nº 2 es más completo. Se define de acuerdo con (Gascon et al., 1994) como el inventario de seguridad ss_i y el tiempo de cambio de partida denominado c_i .

$$RO = 2 \rightarrow RO_i = \frac{I_i - ss_i}{d_i} - c_i \quad (6.2)$$

El modo de cálculo del RO nº 3 es original de esta tesis y considera el ratio de utilización de la máquina p_i .

$$RO = 3 \rightarrow RO_i = \frac{I_i (1 - d_i/p_i)}{d_i} \quad (6.3)$$

En la siguiente tabla (Tabla 6.10) se resumen las opciones para el cálculo del RO.

Tabla 6.10. Opciones para el cálculo del *Run Out*

$RO = 1$
$RO_i = \frac{I_i}{d_i}$
$RO = 2$
$RO_i = \frac{I_i - ss_i}{d_i} - c_i$
$RO = 3$
$RO_i = \frac{I_i(1 - d_i/p_i)}{d_i}$

A continuación se aplican los distintos modos de cálculo del *RO* a los datos iniciales de Bomberger (Tabla 6.1). Tal y como se observa en la Tabla 6.10 resultan valores distintos de *RO* según sea el método utilizado y esto definirá secuencias de fabricación distintas. Como se ha comentado en el apartado anterior las secuencias de fabricación se establecen de acuerdo con ratios de cobertura crecientes.

Tabla 6.11 Cálculo del *RO* de acuerdo con las tres opciones para los datos iniciales de Bomberger

Productos ordenados con <i>RO</i> crecientes	Modo cálculo <i>RO</i> = 1	Productos ordenados con <i>RO</i> crecientes	Modo cálculo <i>RO</i> = 2	Productos ordenados con <i>RO</i> crecientes	Modo cálculo <i>RO</i> = 1
4	6,454	8	5,378	8	4,815
8	6,521	4	5,682	4	5,077
2	14,780	3	13,497	3	13,626
3	14,879	2	13,503	2	14,041
10	15,743	10	14,598	10	15,323
5	19,738	5	17,381	9	17,581
9	21,182	9	19,254	5	18,948
6	42,850	6	40,718	6	42,279
1	67,018	1	64,771	1	66,124
7	82,250	7	78,903	7	81,428

El detalle del cálculo de esta Tabla 6.10 se encuentra en la Tabla A.2 de los anexos.

6.4.3 Longitud de ciclo mínima

Se ha observado en la literatura revisada, que es común que se establezca una duración mínima para las órdenes de fabricación, con el objetivo de evitar tamaños de lote excesivamente pequeños (Oner y Bilgic, 2008; Soman et al., 2006). En el caso de que no se cumpla esta longitud mínima de ciclo, que en muchas ocasiones no está claramente definida, el sistema puede tomarse un periodo libre (Bomberger, 1966) o aumentar el tamaño de lote de un modo indefinido de nuevo (Soman et al., 2006). Es por ello, que se considera interesante plantear una serie de parámetros que permitan distintas opciones en relación a la longitud de ciclo mínima. Puesto que la dinámica de las 5 primeras heurísticas difiere sustancialmente de las otras 4, se establecen distintos parámetros para regular esta longitud en cada caso.

6.4.3.1 Heurísticas 1,2,3,4,5

Se puede decidir si existe un mínimo *run length* de producción, es decir, si cada fabricación debe tener una duración mínima. En caso de que este mínimo *run length* no se cumpla, se puede decidir si el sistema se toma el resto del periodo libre o si se va a escoger el siguiente producto/productos de acuerdo con la lista de *run outs* decreciente. Se plantean las distintas combinaciones, que consideran las variables parámetro, horas y periodo libre:

- Si la longitud en tiempo de la tirada de fabricación debe ser igual al tiempo de *setup* (Parámetro = 0). En el caso de que no sea así, el sistema puede tomarse (Periodo Libre = 1) o no un período libre (Periodo Libre = 0).
- Si la longitud en tiempo de la tirada de fabricación debe tener un mínimo establecido en tiempo (Parámetro = 1). Este tiempo puede ser al menos de 2 horas (Horas = 2), 4 horas (Horas = 4), 6 horas (Horas = 6), u 8 horas (Horas = 8). En el caso de que no sea así, el sistema puede tomarse (Periodo Libre = 1) o no un período libre (Periodo Libre = 0).
- Si no se considera una longitud en tiempo mínima de la tirada de fabricación (Parámetro = 3).

Así resultan once combinaciones que se resumen a continuación Tabla 6.12.

Tabla 6.12. Resumen de Combinaciones

Combinación = 1	Combinación = 2
Parámetro = 0	Parámetro = 0
Periodo Libre = 0	Periodo Libre = 1
Combinación = 3	Combinación = 4
Parámetro = 1	Parámetro = 1
Horas = 2	Horas = 2
Periodo Libre = 0	Periodo Libre = 1
Combinación = 5	Combinación = 6
Parámetro = 1	Parámetro = 1
Horas = 4	Horas = 4
Periodo Libre = 0	Periodo Libre = 1
Combinación = 7	Combinación = 8
Parámetro = 1	Parámetro = 1
Horas = 6	Horas = 6
Periodo Libre = 0	Periodo Libre = 1
Combinación = 9	Combinación = 10
Parámetro = 1	Parámetro = 1
Horas = 8	Horas = 8
Periodo Libre = 0	Periodo Libre = 1
Combinación = 11	
Parámetro = 2	

6.4.3.2 Heurísticas 6,7,8,9

En este caso la longitud mínima del ciclo de fabricación se establece en dos fases. Por una parte, siguiendo con lo comentado en el capítulo 5 de descripción de las heurísticas, en cada iteración es posible redefinir el ciclo mínimo de cada producto de acuerdo con la siguiente fórmula donde f es un parámetro variable.

$$T_{Op} = \alpha T_{pb} \quad (6.4)$$

$$\alpha = \max \left[\left(\frac{fp_i}{T_{pb} k_i d_i} \right)_{i \rightarrow pos(i)=1} \right], \min \left\{ 1, \min_w \left[\frac{RO_w - \sum_{pos(i)=pos(w)-1}^{pos(i)=pos(w)-1} c_i}{\sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} T_{pb} k_i d_i / \rho_i} \right] \right\} \quad (6.5)$$

Esta fórmula indica la aproximación empleada en la heurística 7 al ser la más sencilla. Para observar la influencia del parámetro f en el resto de heurísticas se remite al capítulo 5, en el que se describen en detalle las heurísticas.

En la experimentación, se permite que el parámetro f pueda tomar distintos valores de acuerdo con la Tabla 6.13.

Tabla 6.13. Valores de f

$f = 1$
$f = 3$
$f = 5$
$f = 7$

Por otra parte, en el mismo capítulo 5 se habla de holgura mínima TS_w , que deben cumplir todos los productos, para plantearse la opción de tomarse o no un periodo libre. En principio, de acuerdo con el capítulo 5 se afirmaba que esta holgura debiera ser mayor que 1 (Soman et al., 2004a) de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$TS_w \geq 1 \quad w \in \{Pr(2), \dots, Pr(n)\} \quad (6.6)$$

Pero en este experimento se varían los valores de esa variable, holgura mínima TS_w , de acuerdo con un parámetro de entrada al sistema denominado "Cota Min Holgura", y que a lo largo del documento se referirá como cota mínima en la holgura, o holgura mínima que ha de existir entre dos órdenes productivas.

$$TS_w \geq \text{Cota Min Holgura} \quad w \in \{Pr(2), \dots, Pr(n)\}$$

Así las combinaciones posibles se resumen en la Tabla 6.14.

Tabla 6.14. Resumen Combinaciones

Combinación = 12	Combinación = 13
Cota Min Holgura = 1	Cota Min Holgura = 1
Periodo Libre = 0	Periodo Libre = 1
Combinación = 14	Combinación = 15
Cota Min Holgura = 2	Cota Min Holgura = 2
Periodo Libre = 0	Periodo Libre = 1
Combinación = 16	Combinación = 17
Cota Min Holgura = 4	Cota Min Holgura = 4
Periodo Libre = 0	Periodo Libre = 1

6.4.4 Cantidad de producción actualizada con la demanda.

Se plantea en las heurísticas si actualizar o no la producción pendiente con la demanda. Es decir, si el día 1 se decide fabricar 60.000 del producto 1 pero por su correspondiente *setup* (1 hora) y su ratio de producción (30.000) no es posible fabricar todo el lote ese día. La cuestión es, si el día 2 se hereda la cantidad restante a fabricar (33.750) o a esta cantidad se le debe sumar la demanda de ese día 2 (33.750+400). Para cada una de las heurísticas se plantean las dos opciones.

Realmente, si actualizamos la producción pendiente de un día con la demanda de ese día no estamos considerando al 100% todos los cálculos previos de lotes, inventarios máximos etc. Pero esta actualización, a veces sucede en la práctica. Incluso es posible puede que dé buenos resultados, por la estocasticidad de la demanda.

Tanto en la práctica como en la experimentación, se observa que no tiene una importancia considerable en ninguna de las heurísticas, pues los resultados actualizando o no la cantidad a producir con la demanda son muy similares de acuerdo con el anexo A.4. Es por esto, que este parámetro de diseño no se considera para los análisis.

6.4.5 Reglas de selección de coproducción

Tal y como se ha comentado en el capítulo 5 de descripción de las heurísticas se han diseñado distintas reglas.

- Basadas en la secuencia del Ratio de Cobertura o *RO* (*run out*). Se denomina *Regla Secuencia RO* y puede tomar los siguientes valores:

$$\text{Regla Secuencia RO} = 1 \rightarrow l(j) \leq 2$$

$$\text{Regla Secuencia RO} = 2 \rightarrow l(j) \leq 3$$

$$\text{Regla Secuencia RO} = 3 \rightarrow l(j) \leq 4$$

$$\text{Regla Secuencia RO} = 4 \rightarrow l(j) \leq 5$$

Siendo $l(i)$ la posición del coproducto j en la secuencia del Ratio de cobertura crecientes.

- Basadas en el valor del Ratio de Cobertura. Se denomina *Regla Valor RO* y puede tomar los siguientes valores.

$$\text{Regla Valor RO} = 1 \rightarrow RO_j \leq T_j / 4$$

$$\text{Regla Valor RO} = 2 \rightarrow RO_j \leq T_j / 2$$

$$\text{Regla Valor RO} = 3 \rightarrow RO_j \leq 3T_j / 4$$

$$\text{Regla Valor RO} = 4 \rightarrow RO_j \leq T_j$$

Siendo T_j el valor del tiempo de ciclo del coproducto j .

- Basadas en el inventario del Coproducto. Se denomina *Regla Stock Coproducto* y puede tomar los siguientes valores.

$$\text{Regla Stock Coproducto} = 1 \rightarrow I_j \leq s_j$$

$$\text{Regla Stock Coproducto} = 2 \rightarrow I_j \leq 0.25(ss_j + S_j)$$

$$\text{Regla Stock Coproducto} = 3 \rightarrow I_j \leq 0.5(ss_j + S_j)$$

$$\text{Regla Stock Coproducto} = 4 \rightarrow I_j \leq 0.75(ss_j + S_j)$$

Siendo S_j el inventario máximo, ss_j el inventario de seguridad y s_j el nivel mínimo de inventario del coproducto j .

A continuación se muestra una tabla resumen con las distintas opciones (Tabla 6.15).

Tabla 6.15. Reglas de Selección de Coproducción

Regla Secuencia $RO = 1$	Regla Valor $RO = 1$	Regla Stock Coproducto = 1
$l(j) \leq 2$	$RO_j \leq T_j / 4$	$I_j \leq s_j$
Regla Secuencia $RO = 2$	Regla Valor $RO = 2$	Regla Stock Coproducto = 2
$l(j) \leq 3$	$RO_j \leq T_j / 2$	$I_j \leq 0.25(ss_i + S_i)$
Regla Secuencia $RO = 3$	Regla Valor $RO = 3$	Regla Stock Coproducto = 3
$l(j) \leq 4$	$RO_j \leq 3T_j / 4$	$I_j \leq 0.5(ss_i + S_i)$
Regla Secuencia $RO = 4$	Regla Valor $RO = 4$	Regla Stock Coproducto = 4
$l(j) \leq 5$	$RO_j \leq T_j$	$I_j \leq 0.75(ss_i + S_i)$

6.5 Modelo de simulación

El modelo de simulación ha sido desarrollado por la doctoranda, empleando el lenguaje JAVA sobre la plataforma Anylogic v.6.2.2. AnyLogic es una herramienta desarrollada por XJ Technologies. AnyLogic incluye un lenguaje de modelado gráfico y también permite que los usuarios puedan ampliar los modelos de simulación con código de Java.

El modelo dispone de dos módulos principales. En el primer módulo se seleccionan las condiciones iniciales de la simulación, que afectan a los datos de entrada y parámetros de diseño de la misma. Esto es: heurística a simular, productos, coproductos, valores de los inventarios iniciales, la posibilidad de coproducción y los parámetros de diseño. En la siguiente figura aparecen dos capturas de pantalla para ese modulo. La parte superior de la Figura 6.2 se corresponde con la pantalla para las heurísticas 1,2,3,4,5 y la Figura 6.3 se corresponde con las heurísticas 6,7,8,9.

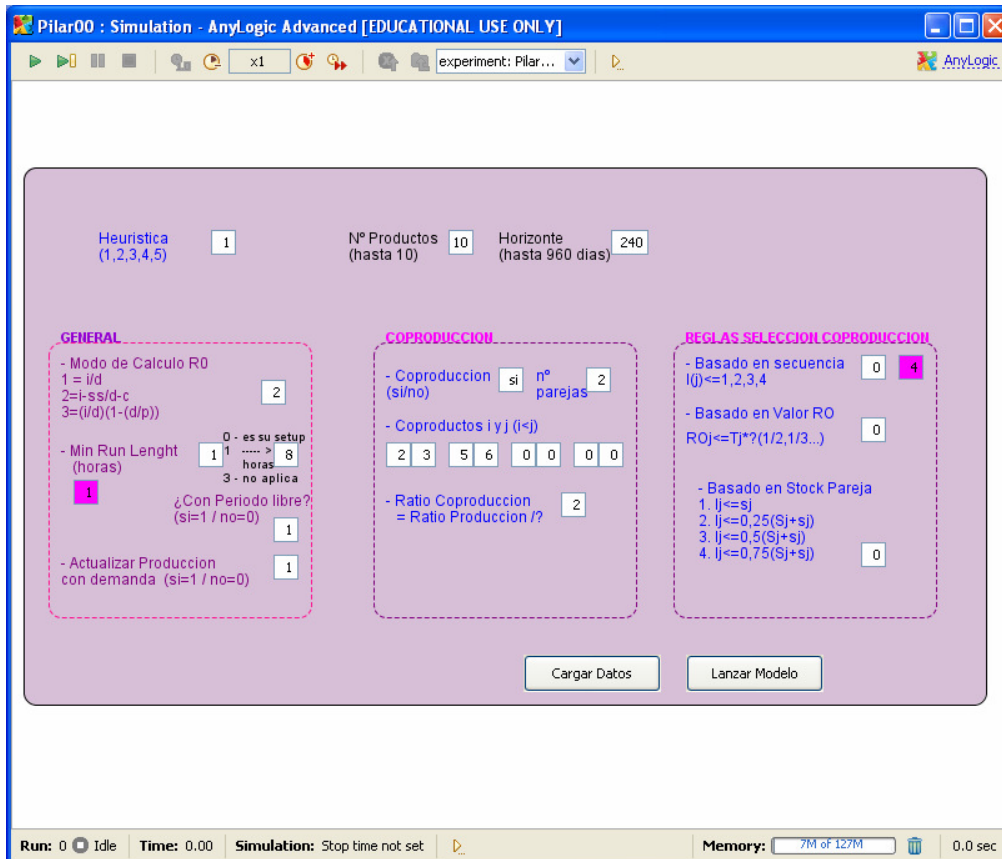


Figura 6.2. Pantalla de entrada Heurísticas 1...5

El segundo módulo del modelo ejecuta la heurística con las opciones seleccionadas y presenta los resultados de acuerdo con la forma escogida. Es posible por ejemplo escribir los resultados en ficheros de texto, hojas de cálculo, archivos xml o mediante gráficas dibujadas por el mismo programa.

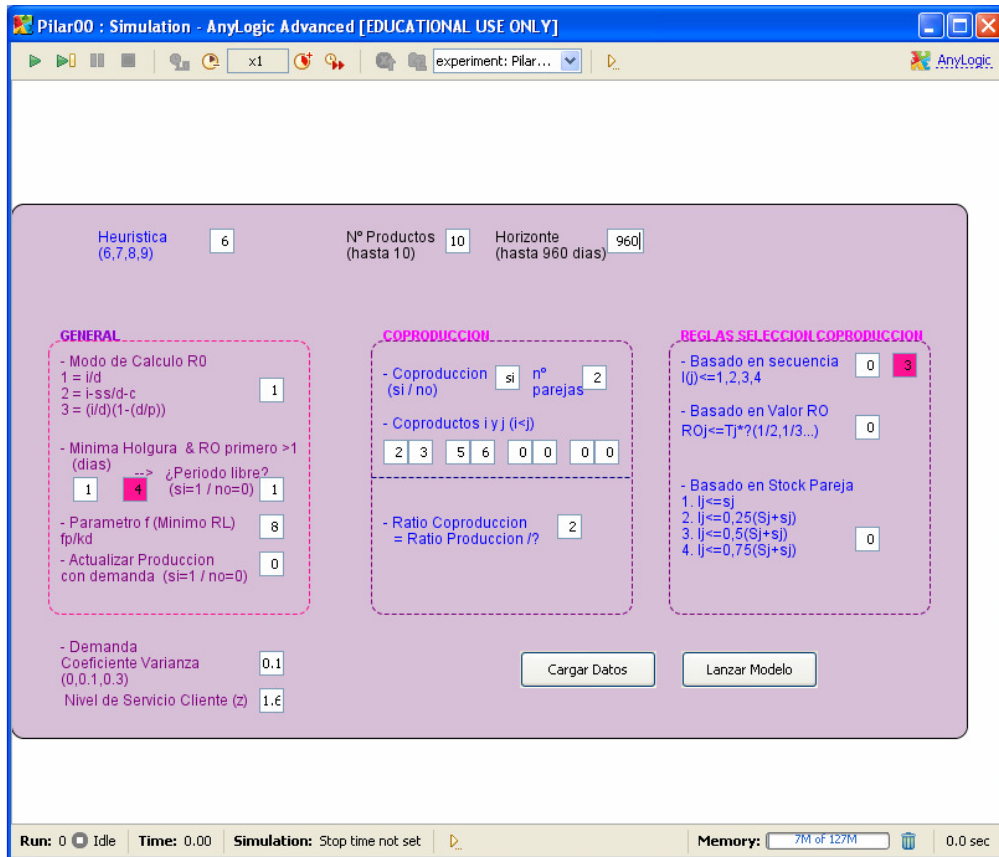


Figura 6.3. Pantalla de entrada Heurísticas 6...9

6.5.1 Dinámica del Modelo de Simulación

Los valores de T , n y m son precalculados utilizando los siguientes métodos: (a) algoritmo *DCC-ELSP-2P* (b) algoritmo *DCC-ELSP-2P* empujado. A partir de estos valores, se calculan los distintos niveles de inventarios con las fórmulas que se detallaron en el capítulo 5. Esto se realiza para cada producto sea coproducto o no, considerando la media y desviación estándar de la demanda, el nivel de servicio deseado (95%), y la opción productiva. Los inventarios iniciales se consideran de acuerdo con Tabla 6.8. Se obtienen los siguientes resultados (Tabla 6.16).

En la Tabla A.3 y la Tabla A.4 de los anexos se presenta el equivalente a esta Tabla 6.16 en el caso de una utilización baja y media del sistema respectivamente. Es interesante señalar, como al disminuir la utilización del sistema, los niveles de inventario calculados de acuerdo con el algoritmo *DCC-ELSP-2P*, se incrementan ligeramente en promedio.

Tabla 6.16. Valores precalculados para la simulación (ratio de utilización 88%)

Producto	Opción Productiva	Cálculo T	$T(\text{días})$	n	m	ss	s	S
1	1		167,53	*	*	849	899	67.017
2	2		51,35	1	1	473	573	15.663
3	3		51,35	1	1	729	929	17.618
4	4		19,53	*	*	1.035	1.235	25.814
5	5		131,836	2	1	88	128	3.643
6	6		131,836	2	1	152	192	8.721
7	7	<i>DCC-ELSP-2P</i>	204,33	*	*	56	80	4.935
8	8		20,52	*	*	218	388	5.542
9	9		61,48	*	*	401	656	18.005
10	10		39,26	*	*	408	458	15.742
2	23		51,35	1	1	473	573	21.113
3	23		51,35	1	1	729	929	42.010
5	56		131,84	2	1	88	128	7.159
6	56		131,84	2	1	152	192	10.738
1	1		153,09	*	*	811	861	61.281
2	2		76,55	1	2	408	508	15.599
3	3		76,55	1	2	817	1.017	25.894
4	4		19,14	*	*	1.024	1.224	25.311
5	5		153,09	2	1	94	134	4.217
6	6		153,09	2	1	163	203	8.732
7	7	<i>DCC-ELSP-2P</i>	153,09	*	*	49	73	3.710
8	8	Embuclado	19,14	*	*	211	381	5.186
9	9		76,55	*	*	447	702	22.303
10	10		38,27	*	*	403	453	15.354
2	23		76,55	1	2	408	508	15.817
3	23		76,55	1	2	817	1.017	44.074
5	56		153,09	2	1	94	134	8.299
6	56		153,09	2	1	163	203	12.451

Resumidamente, pues se detalló en el apartado de descripción de las heurísticas, la secuencia de tiempo en el modelo de simulación es la siguiente:

- La demanda de cada producto se genera al inicio de cada período. La demanda se completa desde el inventario. Se actualizan los niveles de inventario. Si la demanda no se puede satisfacer se pierde de acuerdo con los costes de pérdidas de ventas proporcionales a las unidades perdidas y al coste por unidad.
- Al inicio de cada periodo, los tiempos de *run out* se calculan para todos los productos. Siempre que no se continúe la producción del día anterior, se escoge aquel que tiene el menor *run out* para su fabricación en ese día.
- La producción diaria de cada ítem se pone en el inventario al final del día.

- El modo de producir los productos (con o sin coproducción) se escoge de acuerdo con las reglas de coproducción establecida. Las cantidades de producción se calculan de acuerdo con los criterios de la heurística escogida.

Se considera que cada periodo es un día. Como se ha comentado para cada heurística se lanza una simulación de 960 días. Al final de cada simulación, el programa muestra un resumen de los resultados.

6.6 Resumen de la experimentación

En este apartado se presenta la Tabla 6.17, que muestra el número de casos que resultan de la combinación factible de los datos y parámetros comentados en los anteriores apartados. La Tabla 6.17 enumera las distintas opciones de parámetros de diseño, y sus posibles opciones. A continuación, se presentan dos columnas que pretenden resumir el número de casos resultantes al contemplar todas las posibles combinaciones. Como se ha visto que determinados parámetros dependen de las heurísticas, se considera adecuado dividir la tabla en estas dos columnas, que agrupan a las heurísticas en dos grupos. El primer grupo lo componen las heurísticas más sencillas 1,2,3,4,5 y el segundo grupo las heurísticas más elaboradas esto es 6,7,8,9. Así considerando los 3 modos de cálculo de RO , y las 12 reglas de coproducción posibles para todas las heurísticas, resultan 36 combinaciones por heurística. Al considerar la longitud de ciclo de fabricación mínima, resultan las 11 posibles combinaciones para las heurísticas 1,2,3,4,5. Para el resto de heurísticas, se plantean un total de 6 combinaciones junto con los 4 posibles valores de f . Con todo esto resulta un total de 5.436 (1980+3456) experimentos los que se deben lanzar para cada escenario. Considerando que se plantean tres escenarios de simulación un ratio de utilización alto, medio y bajo el número de experimentos asciende a 16.308.

Tabla 6.17 Resumen casos de la experimentación

		Nº de Casos	
HEURÍSTICAS	Posibles Valores	heurísticas 1,2,3,4,5	heurísticas 6,7,8,9
Heurística	1,2,3,4,5,6,7,8,9	5	4
DISEÑO HEURÍSTICAS		heurísticas 1,2,3,4,5	heurísticas 6,7,8,9
Run Out			
Modos de cálculo	1,2,3	3	3
Reglas Selección Coproducción			
(1) Basada en la secuencia de los <i>run outs</i>	1,2,3,4	12	12
(2) Basada en el valor del <i>run out</i> del coproducto	1,2,3,4		
(3) Basada en el <i>stock</i> del coproducto	1,2,3,4		
Heurística 1,2,3,4,5			
Combinación	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	11	
Heurística 6,7,8,9			
Combinación	12,13,14,15,16,17		6
<i>f</i> (corrector <i>T</i>)	1,3,5,7		4
Subtotales		(5*3*12*11) 1.980	(4*3*12*6*4) 3.456
		(5.436)	
DISEÑO ESCENARIOS			
Ratio de utilización escenarios	44%,66%,88%	3	
Total		16.308	

En la siguiente Tabla 6.18 se presenta de modo resumido las condiciones de los datos de entrada de los experimentos y en la Tabla 6.19 los parámetros de coproducción, ratios, *setups* y demandas.

Tabla 6.18 Resumen datos de entrada de la experimentación

DATOS ENTRADA	
Número Productos	
I	10
Con Coproducción	
Numero coproductos	4
Coproductos	
lj	3&2, 5&6

Tabla 6.19 Resumen parámetros de coproducción de la experimentación

PARÁMETROS COPRODUCCIÓN	
Ratio Coproducción	
pij	pi/2
Setup Coproducción	
Aij	max (Ai, Aj)
cij	max (ci, cj)
Cv de la demanda	
	0,1

6.7 Conclusiones

En este capítulo, se plantea qué datos y parámetros van a condicionar la experimentación mediante la cual, se va a determinar cuál es la mejor heurística para el problema planteado. El problema es un sistema multi-ítem en el que para el 40% de los productos, se considera coproducción deliberada y controlada en el entorno del *ELSP*. Los costes y tiempos de *setup* de los procesos de coproducción se consideran el máximo de los costes y tiempos de *setups* de la producción de cada producto de manera aislada, y los ratios de coproducción se consideran la mitad del valor de cada producto de manera aislada. De este modo, se podrían variar los datos del problema de infinitos modos. Por ejemplo planteando que los costes y tiempos de *setup* de los procesos de coproducción son el mínimo, promedio, etc de los costes y tiempos de *setups* de la producción de cada producto de manera aislada. Así como, planteando el que la tasa de coproducción para cada producto es igual, un tercio, el doble, etc. de las tasa de producción independiente. En esos casos los resultados del análisis, serían seguramente distintos, porque nos encontraríamos ante otras tesis.

Como se ha detallado los casos a considerar resultado de las combinaciones factibles de los parámetros de diseño son numerosos, lo que exigirá una extensa experimentación. Además, existen parámetros que son específicos de las heurísticas y sólo se pueden aplicar a algunas de ellas. Sin embargo, se ha de destacar que han sido muchas más las combinaciones que se han experimentado y que no se presentan en esta tesis, por no mejorar de manera significativa los resultados.

Capítulo 7

Análisis de la Experimentación

7.1 Introducción

En este capítulo, se analizan los resultados de la experimentación. La variable que se emplea para la comparación de resultados, tanto de heurísticas como de parámetros de diseño, son los costes, ya sean medidos de manera absoluta o relativa como porcentaje respecto a un valor concreto. Así, una heurística será mejor que otra siempre cuando sea más barata. El problema de estudio es el problema de Bomberger al 88% de utilización (Bomberger, 1966) como se ha descrito en el anterior capítulo.

El análisis se compone de varias partes. En primer lugar se realiza un análisis estadístico general de los resultados, que permite dar una visión global del comportamiento de las heurísticas y analizar los mejores resultados para cada heurística. A continuación se analiza la distribución de las heurísticas para conocer su dispersión. Así, es necesario realizar un estudio del comportamiento detallado de los parámetros de diseño, obteniendo para cada parámetro cual es la mejor opción considerando el promedio de costes.

Al analizar los resultados para el problema de Bomberger modificado con coproducción, con un ratio de utilización del sistema alto, del 88%, se ha considerado oportuno comparar las conclusiones obtenidas planteando los experimentos para dos nuevos escenarios. Estos escenarios responden al mismo problema de Bomberger con una utilización baja del 44%, y con una utilización media del 66%. Se pretende comprobar el comportamiento de las heurísticas en condiciones sustancialmente diferentes.

7.2 Análisis estadístico de resultados

Se plantean en una gráfica el valor medio, máximo y mínimo de los costes totales de cada heurística (Figura 7.1) y mediante porcentajes (Figura 7.2). Los porcentajes sobre los costes considerados son dos. Por una parte el % sobre su mejor resultado relativo, que nos muestran la desviación en porcentaje de cada resultado respecto al mejor resultado de esa heurística, Figura 7.2(a). Por otra parte el % sobre su mejor resultado absoluto, Figura 7.2(b), que muestra la desviación en porcentaje de cada resultado al mejor resultado global de todas las heurísticas. Los valores asociados a estas gráficas se muestran en la Tabla A.5 de los anexos. Esta gráfica por definición tendrá la misma tendencia que la gráfica de costes totales puesto que muestra lo mismo pero con distintas unidades.

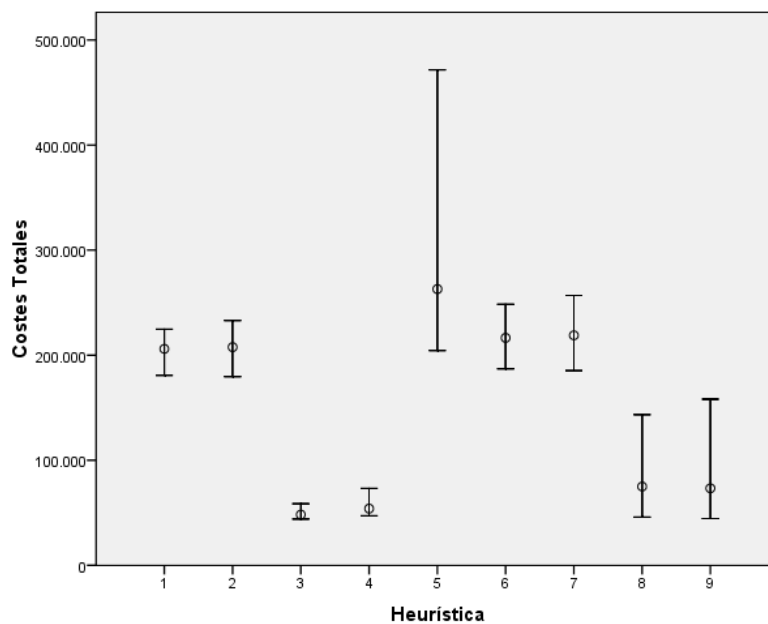


Figura 7.1 H1..9-88%.Análisis de medias, máximos y mínimos de costes totales

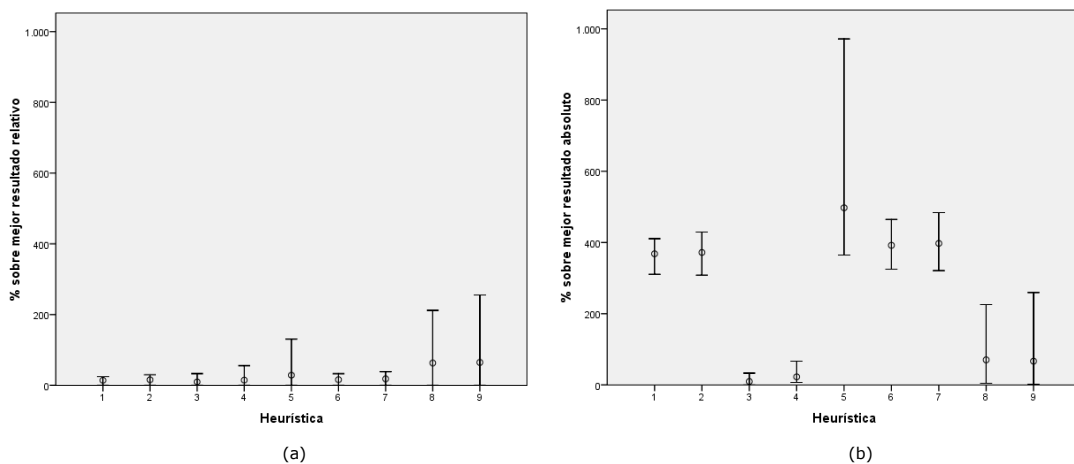


Figura 7.2 H1..9-88%. Análisis de medias, máximos y mínimos: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

En la Figura 7.2(a) se muestra que las heurísticas 8 y 9 son las que mayor rango en % sobre el mejor resultado relativo tiene en torno al 200% y al 250%. Además respecto a la media en % sobre el mejor resultado relativo las heurísticas 8 y 9, también tienen los valores más elevados de las 9 heurísticas, concretamente en torno al 60%. La heurística 5 también tiene un rango sobre el mejor resultado relativo considerable en torno al 130%. Así, a priori a la vista de esta gráfica parece que estas tres heurísticas 8,9,5 son candidatas a ser heurísticas bastante sensibles respecto a los parámetros de diseño. El resto de heurísticas 1,2,3,4,6,7 presenta un comportamiento en rango y media en % sobre el mejor resultado relativo bastante similar en torno al 30% y al 15% respectivamente. Así, se puede prever que las heurísticas 1,2,3,6,7 son menos sensibles a los parámetros de diseño, aunque será necesario corroborarlo analizando todos los datos. El orden respecto a medias sobre el mejor resultado relativo sería el siguiente: 3,4,1,2,6,7,5,8,9. El orden respecto a rangos 1,2,3=6,7,4,5,8,9 que se presenta como un posible orden respecto a la sensibilidad de los parámetros.

La Figura 7.2(b) informa sobre la bondad de las heurísticas en coste puesto que compara respecto al mejor resultado absoluto. El mejor resultado absoluto como se detallará en el posterior apartado pertenece a la heurística 3. En esta Figura 7.2(b) se observa que para las heurísticas 1,2,5,6,7 el tramo que describe el rango se encuentra muy desplazado hacia arriba. Concretamente la media sobre el mejor resultado absoluto está en torno al 400%. Además el valor mínimo de estas heurísticas también está muy lejos del mejor resultado, en torno al 300%. Esto hace que se planteen como candidatas a eliminar del resto del análisis a las heurísticas 1,2,5,6,7 por su mal comportamiento en cuanto a costes, que se corroborará en posteriores apartados. Entre estas heurísticas 1,2,5,6,7 continúa destacando la heurística 5 con un rango en torno al 600% que parece ser muy sensible a los parámetros de diseño. Las heurísticas 3,4,8,9 destacan por la cercanía de su valor mínimo al 0% sobre el mejor resultado absoluto. En la gráfica se observa la robustez de las heurísticas 3 y 4 puesto que sus rangos son muy reducidos. Las heurísticas 8,9 se presentan como candidatas a heurísticas bastante sensibles a los parámetros, aunque como se observa por la posición de la media la distribución de los valores no estará equilibrada. Si se establece un orden respecto a medias sobre el mejor resultado absoluto este sería el siguiente: 3,4,9,8,1,2,6,7,5 que se presenta como un orden respecto a la bondad media de las heurísticas, con elevadas diferencias entre las 4 primeras heurísticas (3,4,8,9) y el resto.

Con los mínimos de la gráfica se pueden obtener los mejores resultados como se detallará en el siguiente apartado.

7.3 Análisis de los mejores resultados

En este apartado se pretende detallar este mínimo o mejor resultado, indicando el valor de los parámetros de diseño y de los costes. Las siguientes Tabla 7.1 y Tabla 7.2 detallan esas circunstancias.

En la Tabla 7.1 se observan los malos resultados de las heurísticas 1,2,6,7. Para estos mejores resultados de las cuatro heurísticas, se observa como los parámetros de diseño relacionados con el *minimo run lenght* o la longitud mínima de la tirada de fabricación y el periodo libre no les afectan. El comportamiento es el mismo para las combinaciones de parámetros 1,2,3,5,6,7,8,11 (Tabla A.8 de los anexos) que están descritas en el capítulo anterior. Sin embargo, cuando el *minimo run lenght* tiene el valor de 8 horas, esto es, combinaciones 9 y 10, el comportamiento no es el mismo. De igual modo, las reglas de selección de coproducción también influyen.

Tabla 7.1. Parámetros de los mejores resultados de las heurísticas

Heur	RO	parámetro	minimo Run Lenght	periodo Libre	Combinación	Regla Secuencia RO	Regla valor RO	Regla Inventario Coproducto	Costes Totales
1	2	0,1,2	0,2,4,6	0,1	1,2,3,5,6,7,8,11	0	1	0	180.749,160
2	2	0,1,2	0,2,4,6	0,1	1,2,3,5,6,7,8,11	4	0	0	179.584,110
3	2	1	6	1	8	3	0	0	44.001,763
4	2	1	4	0	5	4	0	0	47.080,637
5	3	0	0	0	1	0	0	3	204.428,058

Heur	RO	f corrector	Cota Min Holgura	periodo Libre	Combinación	Regla Secuencia RO	Regla valor RO	Regla Inventario Coproducto	Costes Totales
6	2	5	1,2,4	0,1	12,13,14,15,16,17	0	1	0	186.946,746
7	2	7	1,2,4	0,1	12,13,14,15,16,17	2	0	0	185.225,546
8	2	5	1	1	13	0	1,2,3,4	1	45.961,602
9	1	3	1	1	13	2	0	0	44.488,018

En la Tabla 7.1 destaca el mal resultado de la heurística 5, aunque a priori, parece que los parámetros de diseño sí le influyen, pues el mejor caso presenta una combinación única de los mismos. En el apartado de distribución de casos se comprobará esta conjetura. Los mejores resultados son obtenidos por las heurísticas 3,4,8,9. A priori, con la observación del mejor caso de la Tabla 7.1 no destaca la ligera influencia de los parámetros de diseño de la heurística 3 y 4 que se muestra en el siguiente apartado. La heurística 8 presenta curiosamente un mismo comportamiento siempre que se emplee cualquier versión de la regla del valor del RO. Esta regla se basa en el valor del RO respecto a una fracción del tiempo. Al tratarse de una heurística en la que se recalcula en cada iteración el tiempo de ciclo, su escasa influencia podría ser por lo ajustado de los tiempos de

ciclo en esta versión de la heurística. Es interesante destacar de la Tabla 7.1 como la regla basada en la secuencia del *RO*, que es la más intuitiva y sencilla de las tres, aparece como la que proporciona un mejor resultado en 5 de las 9 heurísticas, y en 3 de las que proporcionan mejores resultados (heurísticas 3,4,8).

En la Tabla 7.2 se desglosan las costes totales de cada heurística en su componente de costes de *setup*, costes de almacenamiento y pérdidas de ventas.

Tabla 7.2. Desglose de costes para los mejores resultados de las heurísticas

Heurística	Costes de <i>Setup</i>	Costes de Inventario	Pérdidas de Ventas	Costes Totales
1	89.290	4.246,867	87.212,293	180.749,160
2	85.970	4.249,397	89.364,713	179.584,110
3	20.165	19.258,935	4.577,828	44.001,763
4	23.580	20.871,093	2.629,545	47.080,637
5	85.565	3.135,805	115.727,253	204.428,058
6	90.885	3.583,273	92.478,473	186.946,746
7	88.790	3.914,549	92.520,997	185.225,546
8	23.635	20.077,583	2.249,019	45.961,602
9	20.090	18.455,555	5.942,464	44.488,018

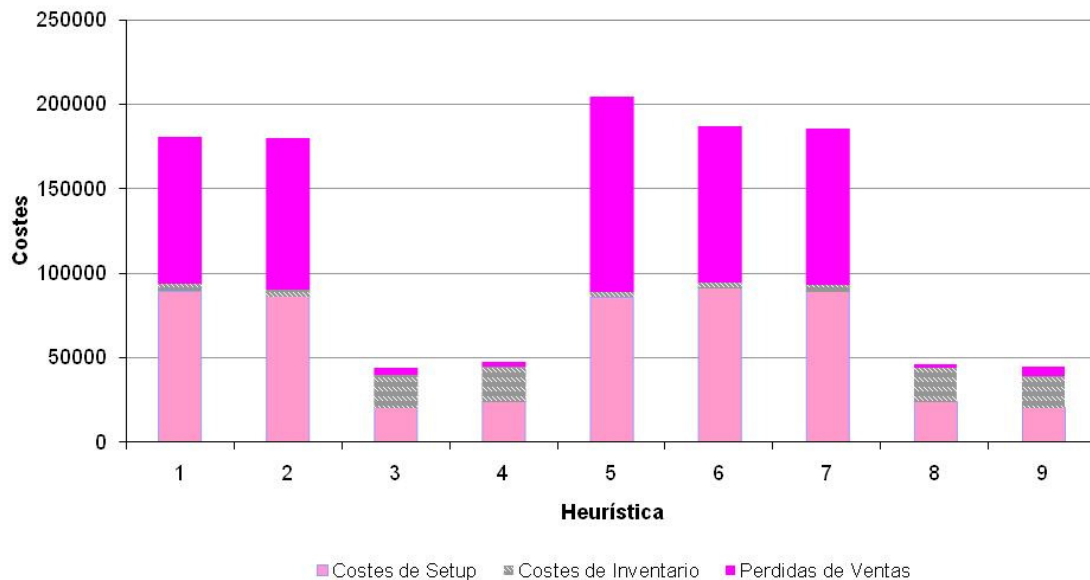


Figura 7.3 Distribución de los Costes Totales para las heurísticas (88%)

De la observación de esta Tabla 7.2 que se encuentra ilustrada en la Figura 7.3, se observa que los mejores resultados se encuentran con costes de inventario y de *setup* relativamente balanceados (heurísticas 3,4,8,9). Así, se corroboraría la hipótesis inicial fundamentada en (Harris, 1913) de que el mejor resultado se

alcanza siempre que se encuentre un equilibrio entre los costes de *setup* y los costes de almacenamiento. En la Figura 7.3 destacan los excesivos costes de *setup* de las heurísticas 1,2,5,6,7 que deterioran los resultados como se observará en detalle en la Tabla 7.4.

De acuerdo con la Tabla 7.3 se aprecia para todas las heurísticas el elevado inventario del producto 1, puesto que es de los 10 productos, el que menor coste de almacenar tiene (0,00065 \$/periodo) y mayor ratio de producción (30.000 unidades/día). Esta circunstancia lleva a las mínimas pérdidas de ventas que genera este producto tanto en coste, como se observará en la Tabla 7.5, como en unidades (Tabla 7.6) Las heurísticas que tienen peores resultados en costes totales (1,2,5,6,7) tienen unos inventarios medios muy pequeños para todos los productos y en especial del producto 5. Para el producto 5 junto con el 6, se considera la coproducción controlada y deliberada, por lo que estos bajos inventarios son un indicio del mal control del fenómeno de coproducción que podrían tener estas heurísticas. Para los coproductos 2 y 3 se aprecia un equilibrio en los inventarios salvo en las heurísticas 3,4,8,9 en el que el inventario del producto 3 supera al del 2, algo que nos puede indicar el buen modelado del fenómeno de coproducción. Esto es así, puesto que cómo se ha definido en el capítulo anterior, el producto denominado comúnmente como *a* en el capítulo 4 o *i* en el capítulo 5, es el que mayor velocidad relativa de consumo tiene, por lo que tiene sentido que su inventario sea ligeramente mayor que el de el producto *b* o *j* que sería el producto 2. Para los productos 5 y 6, en estas heurísticas los inventarios están bastante equilibrados, algo justificable pues aunque la velocidad de 5 es mayor que la de 6, su τ es muy pequeño, puesto que las demandas son iguales, de valor 80 unidades.

Tabla 7.3. Inventarios medios por productos (88%)

Producto	Heurística								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	17.209	15.877	35.277	33.460	8.997	13.726	13.766	77.752	42.410
2	3.380	3.058	12.042	10.748	7.837	3.251	3.317	9.658	12.204
3	3.723	3.646	13.086	14.424	3.183	3.849	3.717	12.567	19.510
4	2.485	2.906	16.505	17.514	4.310	1.834	2.090	19.421	12.223
5	582	612	2.007	2.483	241	531	588	1.932	4.164
6	1.664	2.109	5.166	5.925	1.424	1.941	3.579	4.607	8.691
7	1.484	1.333	2.597	1.962	386	1.226	1.223	6.084	3.359
8	564	565	3.642	3.675	531	378	430	3.498	2.444
9	1.450	1.512	10.844	14.406	730	1.178	1.188	7.211	6.337
10	6.513	6.454	8.635	9.233	3.292	12.258	9.725	39.072	22.646

A continuación, se muestran unas figuras (Figura 7.4, Figura 7.5, Figura 7.6, Figura 7.7, Figura 7.8) que detallan la evolución de inventarios para distintas heurísticas. En todas las figuras destaca el comportamiento del producto 1, respecto al resto.

Este producto, como se detalló en el anterior capítulo 6, al disponer del mayor ratio de producción y del menor coste de almacenamiento de los 10 ítems y de un *setup* bastante reducido, tiene el mayor tiempo de ciclo e inventario máximo (Tabla 6.16).

Se observa que para la heurística 1 (Figura 7.4) aproximadamente a partir del periodo número 100 decaen los inventarios de muchos productos entrando en pérdidas, pues entran en un “*chaotic spike*” (Wilding, 1998).

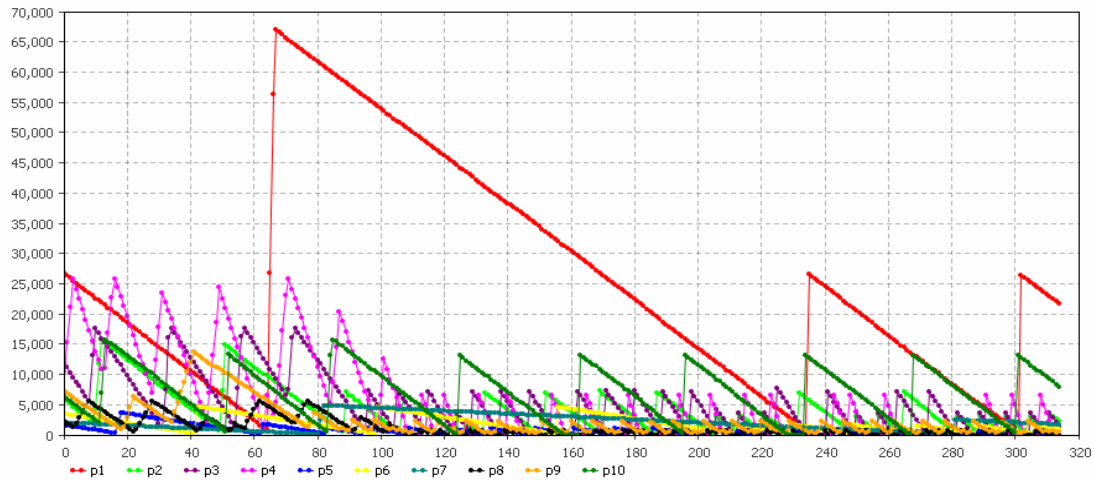


Figura 7.4 H1-88%. Niveles de inventario para todos los productos

El comportamiento de los inventarios de las heurísticas 3 y 4 (Figura 7.5, Figura 7.6) es similar, pues sólo difieren en el modo del cálculo del tiempo de ciclo *DCC-ELSP-2P*. Se aprecia, como en general, para los productos que no son coproductos los tamaños de lote son menores siempre que no estén embuclados (Figura 7.5).

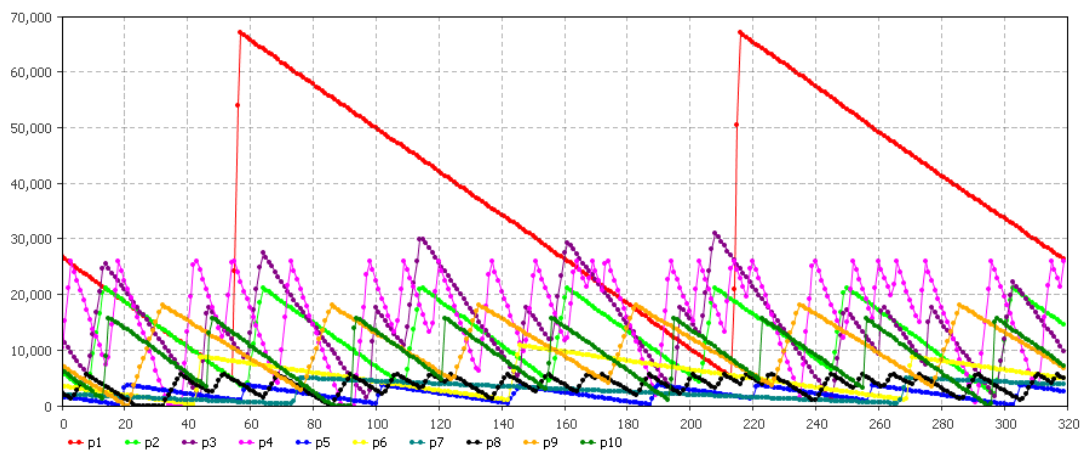
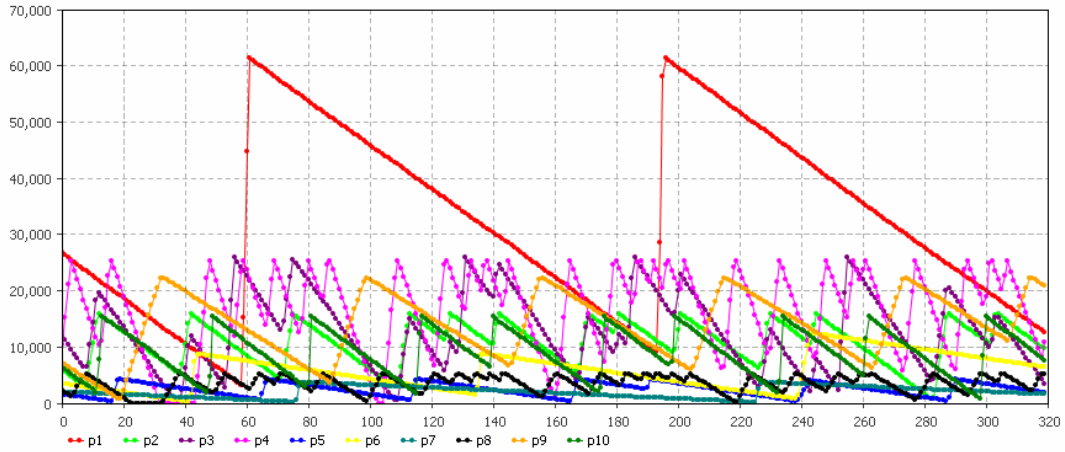


Figura 7.5 H3-88%. Niveles de inventario para todos los productos



En la Figura 7.7 se observa cómo la heurística 8 trabaja con mayores niveles de inventario para el producto 1,4 y 10.

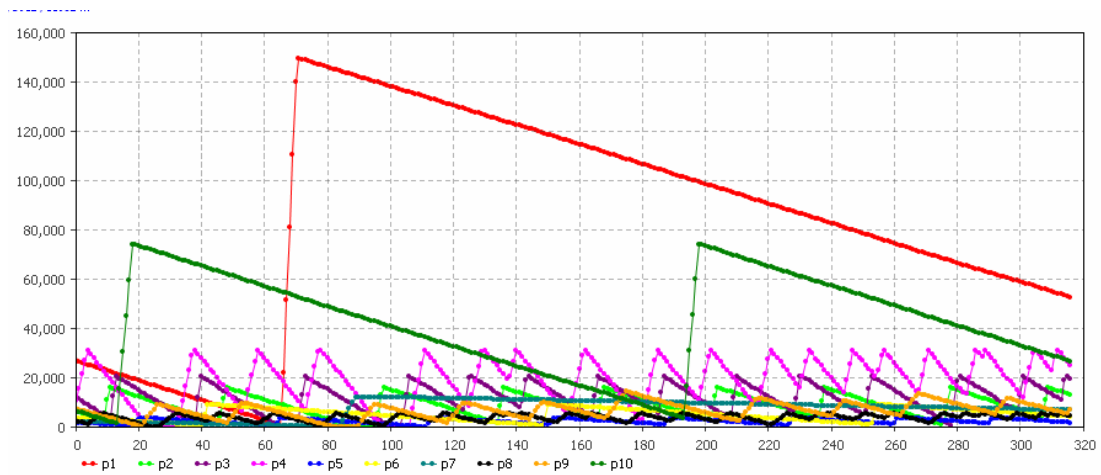


Figura 7.7 H8-88%. Niveles de inventario para todos los productos

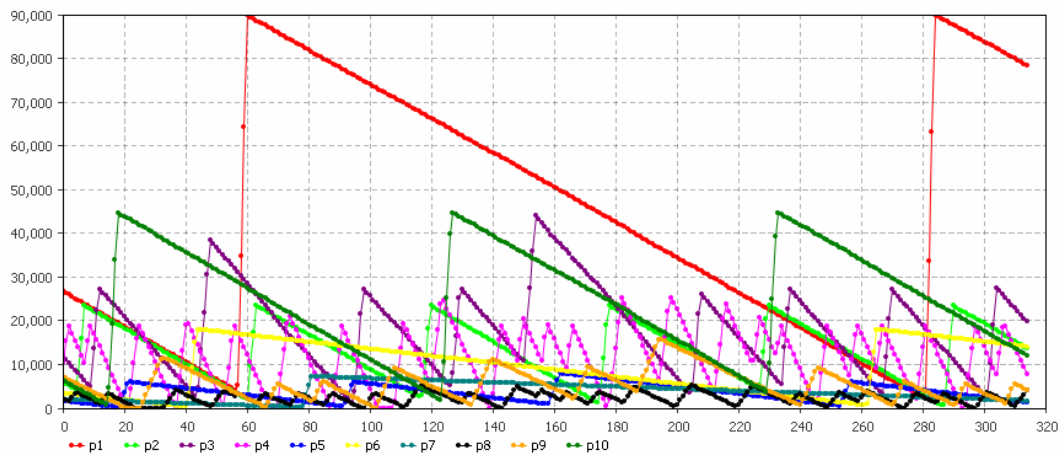


Figura 7.8 H9-88%. Niveles de inventario para todos los productos

Esta circunstancia resulta en menores inventarios para el resto de productos respecto a la heurística 9 (Figura 7.8) como se detalla numéricamente en la Tabla 7.3.

La Tabla 7.4 informa del valor de los tiempos de ciclo de cada una de las opciones productivas comparándolos con el ciclo objetivo o teóricos. Aparecen dos secciones en las tabla, pues como se ha comentado en anteriores apartados las heurísticas 1,3 se basan en el tiempo de ciclo *DCC-ELSP-2P*, y las otras en el tiempo de ciclo *DCC-ELSP-2P* embuclado. Es claro que estas tablas deben realizarse por opción productiva o *stroke* y no sólo por producto debido a la coproducción. Curiosamente la heurística 3, que es la que presenta un mejor resultado en costes de las 9 heurísticas, es la que tiene los tiempos de ciclo más similares a los tiempos de ciclo objetivo.

De acuerdo con la definición teórica del capítulo 3 de modelado de esta tesis, aquel coproducto con menor velocidad relativa debiera no producirse nunca de manera aislada. Sin embargo en la Tabla 7.4 se observa como la secuenciación con una demanda estocástica altera en algunos casos radicalmente esta definición. En ocasiones los productos de menor velocidad relativa de las parejas de coproductos, esto es, de acuerdo con el apartado anterior 2 y 6, apenas se lanzan aislados como sugería el modelo *DCC-ELSP* (heurísticas 3,4,5 para el producto 2 y heurísticas 4,5,6,7 para el producto 3). Sin embargo, para la heurística 8 y 9 la coproducción deliberada de 5 y 6 no se considera en toda la secuenciación tal y como se aprecia en la Figura 7.9 y sin embargo, se alcanza un buen resultado.

Tabla 7.4. Tiempos de ciclo por opciones productivas (*strokes*)

Stroke	Ciclo Objetivo	Tiempo de Ciclo		Ciclo Objetivo	Tiempo de Ciclo						
		1	3		2	4	5	6	7	8	9
1	167,53	73,85	160	153,09	73,85	137,14	480	68,57	68,57	320	192
2	0	27,43	960	0	120	0	480	24,62	24	40	68,57
3	51,35	13,91	36,92	76,55	25,26	64	192	11,85	11,43	22,86	45,71
4	19,53	15	12,80	19,14	12,47	10	23,41	13,52	11,57	16,27	12,97
5	65,92	16	50,53	76,55	15,24	56,47	480	14,12	13,521	38,4	96
6	0	106,67	160	0	96	240	0	0	0	106,67	192
7	204,33	120	192	153,09	106,67	137,1	960	106,67	106,67	480	320
8	20,52	3,74	12,80	19,14	4,02	10	25,26	3,62	3,68	11,16	12,80
9	61,48	4,90	50,53	76,55	5,08	53,33	26,67	4,90	5	30,97	30,97
10	39,26	35,56	35,56	38,27	35,56	30,97	96,00	41,74	40	160	106,67
23	51,35	29,09	50,53	38,27	11,03	24,62	53,33	41,74	56,47	960	320
56	131,84	43,64	320	153,09	56,47	240	120	73,85	480	0	0

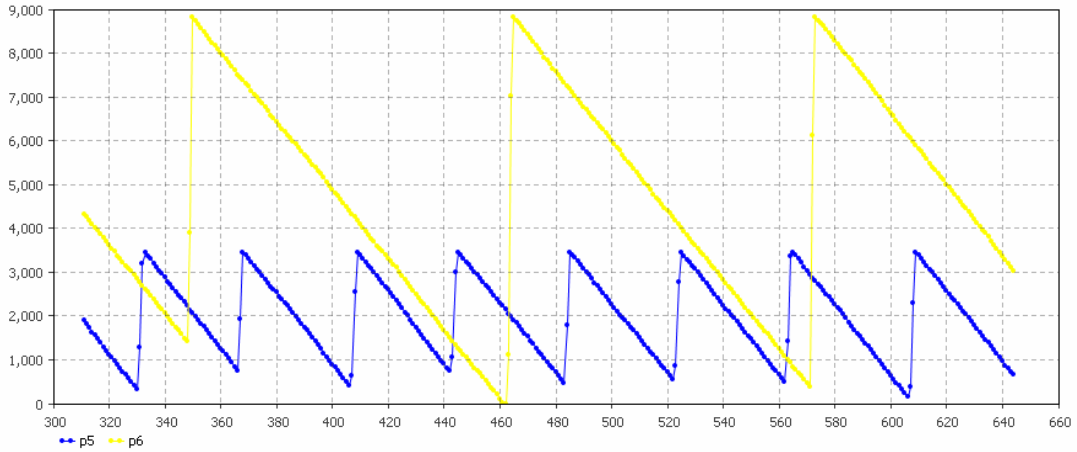


Figura 7.9 H8-88%. Niveles de Inventario para 5-6

A pesar de esto, es conveniente destacar como las heurísticas 3 y 4 a las que pertenecen los mejores resultados, presentan un comportamiento en inventarios de los coproductos muy similar al modelo teórico *DCC-ELSP-2P* (Figura 7.10, Figura 7.11).

Al ser la heurística 3 la que mejor resultado proporciona, parece adecuado mostrar también la evolución de los inventarios de los productos que no se coproducen, como se muestra en la Figura 7.12.

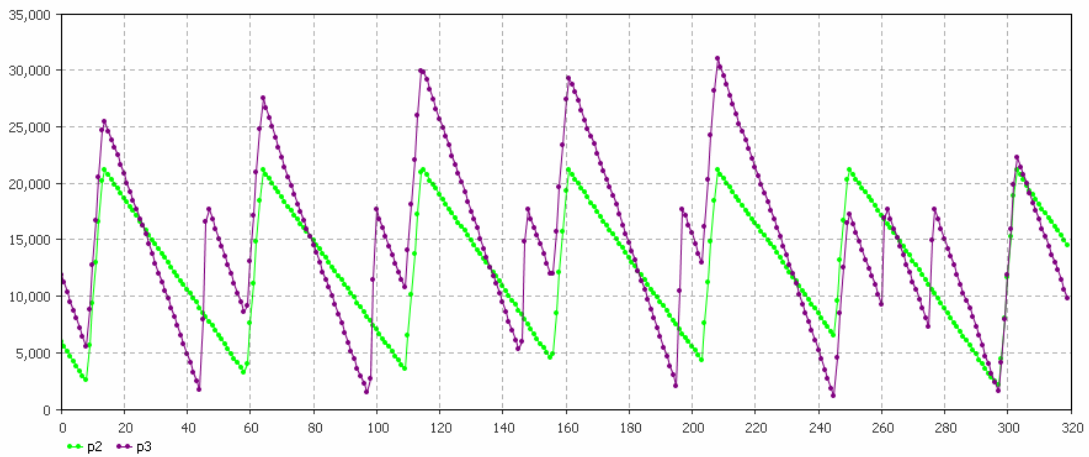


Figura 7.10 H3-88%. Niveles de Inventario para 2-3

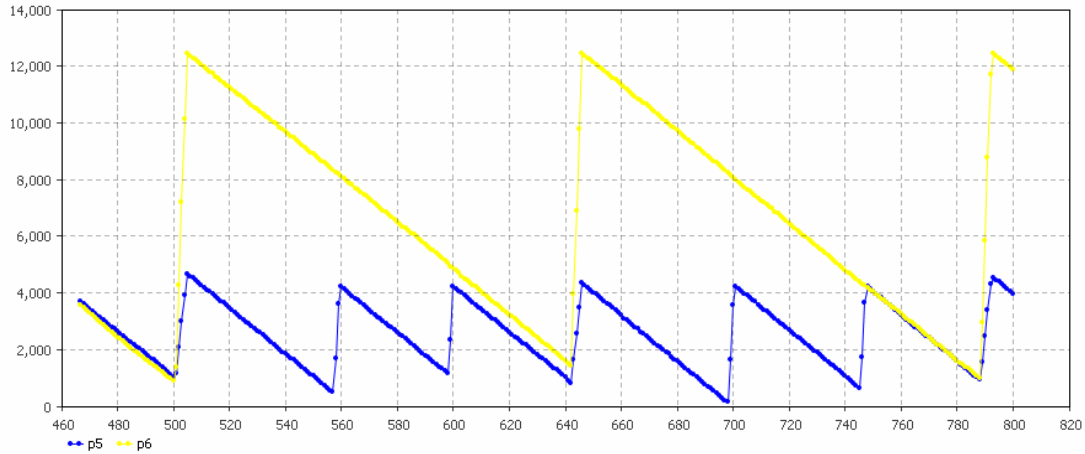


Figura 7.11 H3-88%. Niveles de Inventario para 5-6

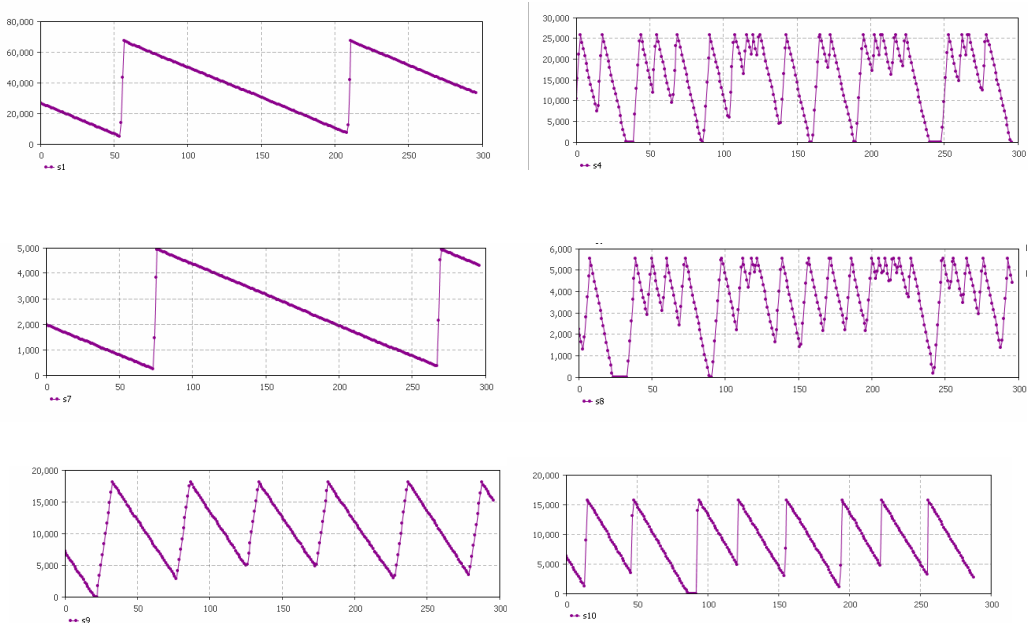


Figura 7.12 H3-88%. Niveles de Inventario para los no coproductos

La Tabla 7.5 muestra para cada uno de los productos el porcentaje de pérdidas sobre el coste total de cada una de ellas. Como se puede apreciar para todas las heurísticas, es el producto 8 el que incurre en mayores pérdidas. Este producto 8 es con diferencia el que mayor coste por unidad tiene (5,9 unidades monetarias/unidades). Así, aunque las unidades sin servir no sean las más elevadas de la Tabla 7.6 es el producto que mayor gasto supone. Del producto 4 es del que más unidades se dejan sin servir para todas las heurísticas, especialmente en la heurística 6 en la que se llega a 1.024.073 unidades (Tabla 7.6). Por ello su aportación a los costes de pérdidas es considerable (Tabla 7.5) Este producto es el que más ratio de demanda tiene (1.600 unidades/tiempo) de los 10 productos.

Realmente si se aprecia la demanda del resto de productos que oscila entre 24 unidades y 400, 1600 unidades/tiempo parece un tanto descompensado.

Tabla 7.5. Porcentaje de pérdidas de ventas por productos (88%)

Producto	Heurística								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
2	0,47%	0,60%	0,00%	0,00%	0,00%	0,59%	0,68%	4,99%	0,10%
3	1,68%	1,72%	2,35%	1,68%	1,27%	1,14%	1,09%	6,99%	0,29%
4	11,42%	9,98%	9,53%	10,15%	1,97%	11,07%	10,24%	16,56%	7,01%
5	0,61%	0,53%	8,01%	0,00%	12,85%	0,50%	0,56%	3,27%	0,00%
6	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,44%	0,00%	0,00%	0,34%	0,00%
7	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,25%	0,00%	0,00%	0,70%	0,08%
8	84,90%	86,46%	78,48%	88,00%	70,42%	86,13%	86,83%	52,41%	87,46%
9	0,82%	0,57%	0,92%	0,00%	10,66%	0,46%	0,51%	14,73%	5,03%
10	0,10%	0,13%	0,70%	0,17%	0,13%	0,10%	0,08%	0,00%	0,03%

Como se observa en la Tabla 7.6, en las heurísticas en el que los resultados son buenos (3,4,8,9), el modelado del fenómeno de coproducción permite que en ocasiones sean mínimas las unidades sin servir del producto 5 y 6, para los que se considera una coproducción controlada y deliberada. Para los productos 2 y 3, se considera de igual modo la opción de coproducción y sigue siendo igualmente destacable las escasas unidades que se quedan sin servir del producto 2.

Tabla 7.6. Unidades perdidas por productos (88%)

Producto	Heurística								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	125	664	1.048	0	15.333	57	0	0	401
2	23.055	30.236	0	0	0	30.541	35.629	6.325	332
3	115.032	120.659	8.430	3.468	114.911	83.000	78.984	12.334	1.368
4	996.266	892.015	43.621	26.693	228.140	1.024.073	947.223	37.235	41.628
5	1.904	1.708	1.317	0	53.406	1.668	1.852	264	0
6	183	117	0	2	19.094	127	48	290	0
7	8	0	0	0	17.345	11	20	105	33
8	125.492	130.961	6.089	3.922	138.118	135.000	136.168	1.998	8.809
9	7.898	5.613	466	0	137.121	4.694	5.266	3.681	3.320
10	21.552	29.518	8.055	1.091	38.544	23.827	19.045	0	382

7.4 Análisis de la distribución

Para tener una visión más completa de la distribución en costes de cada una de las heurísticas se plantea el presente apartado. En las gráficas siguientes, se presenta para cada heurística la distribución de frecuencias, esto es, casos respecto al % sobre su mejor resultado relativo y absoluto en costes. También se traza en cada gráfica su correspondiente curva normal. Cada gráfica incluye en un extremo la media y desviación típica de la distribución y el número de casos. Para que todas las gráficas sean comparables se considera adecuado agrupar los casos en porcentajes de costes con incrementos del 10% sobre su mejor resultado relativo o absoluto. También se mantiene para todos los gráficos la misma escala en el eje X y en el eje Y.

7.4.1 Heurísticas 1,2,6,7

Se considera oportuno analizar conjuntamente el comportamiento de las heurísticas 1,2,6,7 por su similitud. En las siguientes, Figura 7.13, Figura 7.14, Figura 7.15, Figura 7.16, se representa para cada heurística la distribución de casos frente al % sobre su mejor resultado relativo y frente a su mejor resultado absoluto.

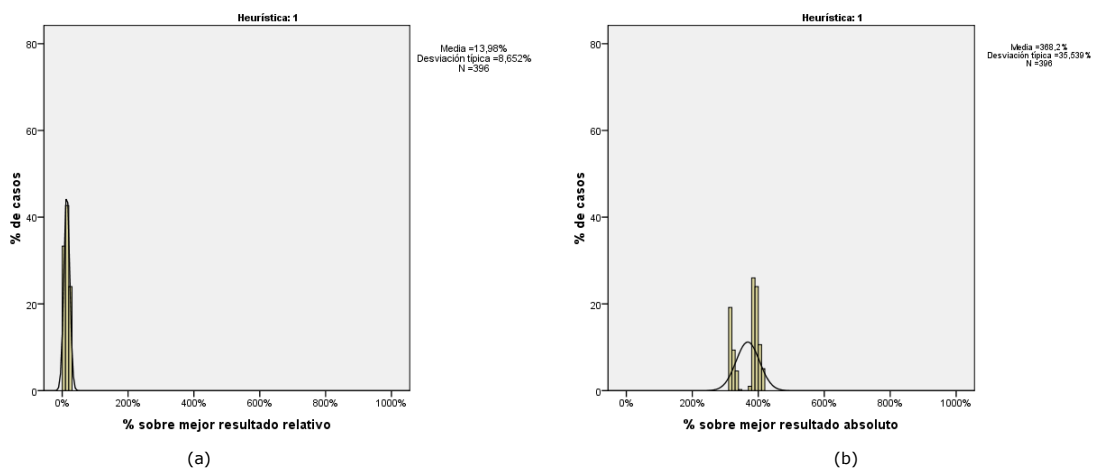


Figura 7.13 H1-88%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo
(b) % sobre su mejor resultado absoluto

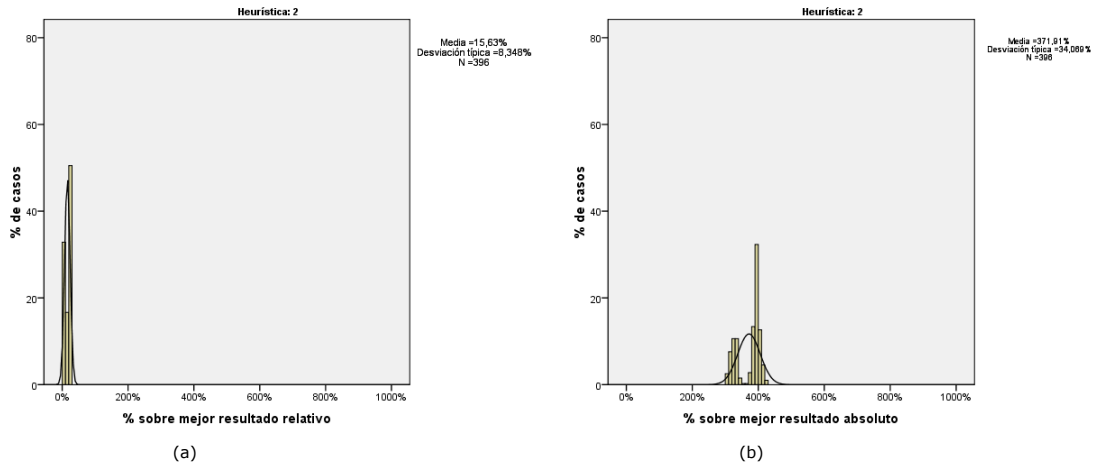


Figura 7.14 H2-88%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado absoluto (b) % sobre su mejor resultado relativo

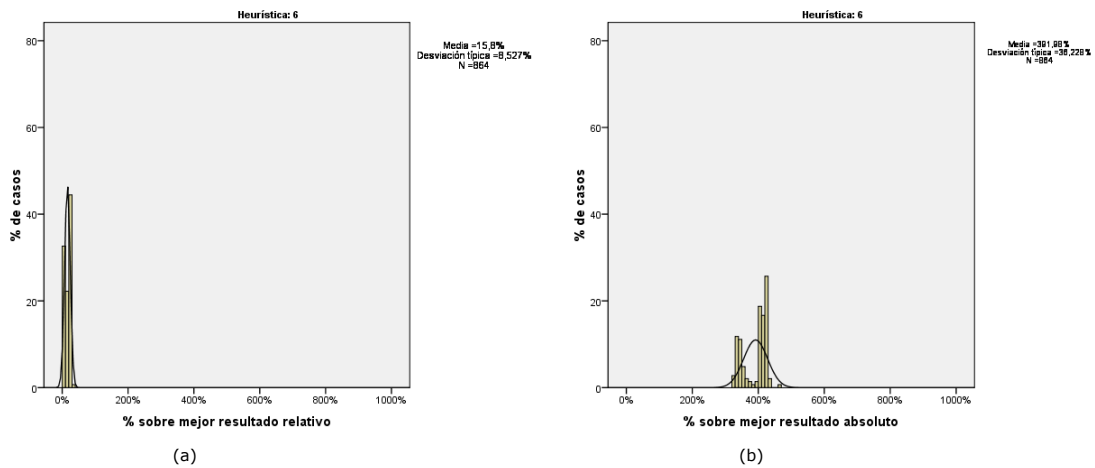


Figura 7.15 H6-88%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

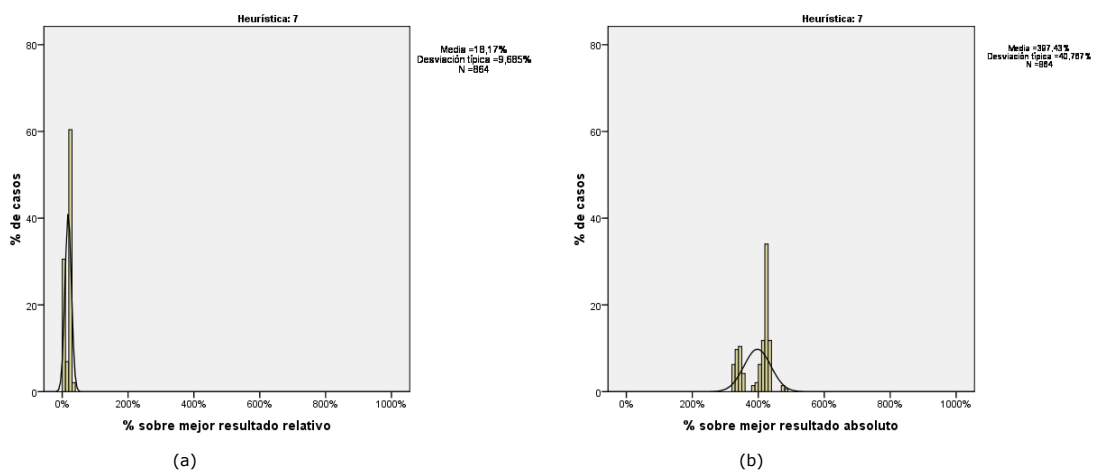


Figura 7.16 H7-88%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

Tal y como apuntaba su gráfico de máximos, mínimos y medias, la dispersión de los valores de la heurísticas 1,2,6,7 es muy reducida, con una desviación típica en torno al 8% (Figura 7.13(a),Figura 7.14(a),Figura 7.15(a),Figura 7.16(a)). Sin embargo, en la Figura 7.13(b),Figura 7.14(b),Figura 7.15(b) y Figura 7.16(b) se aprecia como los resultados obtenidos con estas heurísticas son muy malos a nivel global, puesto que los casos se desvían del mejor resultado absoluto sobre un 380% de media.

Con todo esto podemos indicar que las heurísticas 1,2,6,7 son heurísticas relativamente robustas en sus malos resultados, pues los parámetros de diseño no les afectan en exceso. Esto hace que no se consideren en los análisis posteriores. Para el detalle de los estadísticos de cada una de las heurísticas se remite de nuevo a la Tabla A.5 de los anexos, en la que se puede consultar el detalle de las medias, medianas, curtosis, asimetría etc.

7.4.2 Heurística 5

La heurística 5 sigue la tendencia de la heurística 1,2,6,7 aunque como se observa en la Figura 7.17(a) la dispersión de los valores frente a su mejor resultado relativo es mayor, lo que indica que es más sensible a los parámetros de diseño. Sin embargo, los resultados sobre el mejor resultado absoluto, Figura 7.17(b) son ostensiblemente peores que los de las heurísticas 1,2,5,6, con un media que empeora en torno al 500% el mejor resultado absoluto. Es más, la heurística 5 puede proporcionar resultados de hasta un 980% peores que el mejor resultado absoluto. Además la dispersión de estos resultados es muy elevada, en torno al 91%. La heurística 5 es la que mayor dispersión presenta de las 9 heurísticas respecto al mejor resultado absoluto. Se puede afirmar que la heurística 5 no es robusta en sus malos resultados, pues los parámetros de diseño pueden empeorar aún más sus malos resultados.

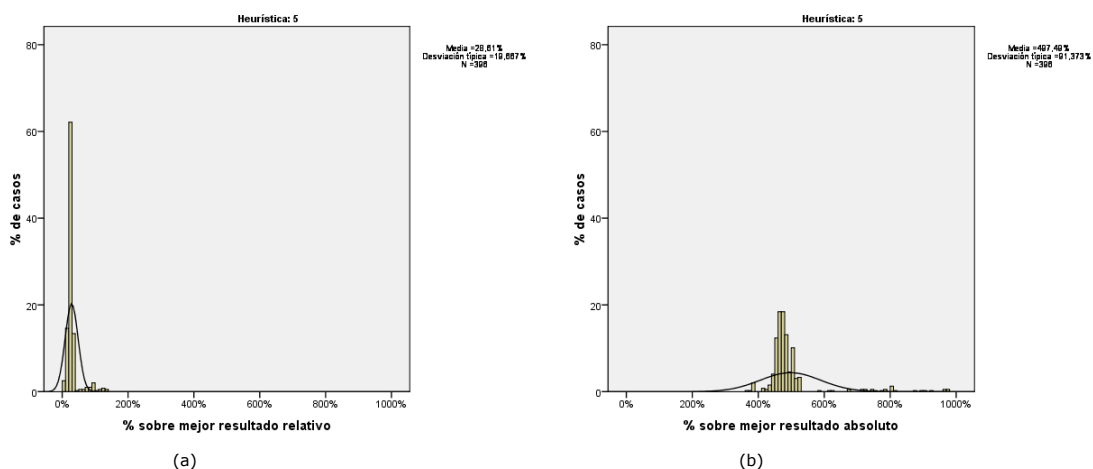


Figura 7.17 H5-88%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo
(b) % sobre su mejor resultado absoluto

7.4.3 Heurísticas 3,4

Las heurísticas 3 y 4 destacaban en el apartado anterior por sus buenos resultados. Se puede corroborar con las siguientes gráficas Figura 7.18, Figura 7.19. Comentar que las dos gráficas (a) y (b) mostradas en la Figura 7.18 son iguales puesto que cómo se ha descrito anteriormente, el mejor resultado de las 9 heurísticas, esto es, el mejor resultado absoluto pertenece a la heurística 3. Para esta heurística se observa que todos sus resultados sólo empeoran en menos de un 33% el mejor resultado absoluto, Figura 7.18(b). La dispersión de los resultados de la heurística es mínima, en torno al 4% tanto para el mejor resultado relativo como para el absoluto. La media de empeoramiento de resultados respecto al mejor absoluto es de un 9.6%. La distribución se asemeja para las dos figuras a una distribución normal. Se observa que es una heurística muy buena y robusta, puesto que no se ve excesivamente afectada por los parámetros de diseño. Específicamente es la que mejor comportamiento global presenta de las 9 heurísticas.

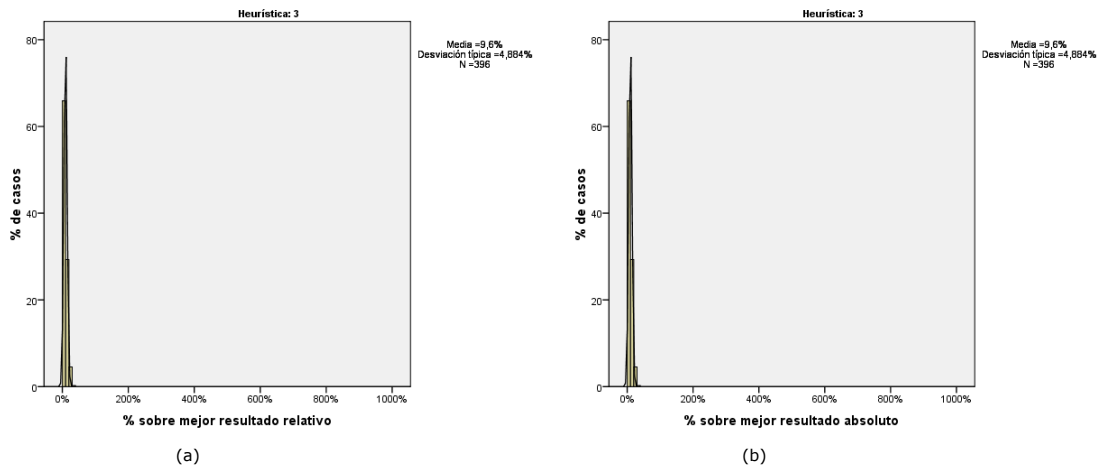


Figura 7.18 H3-88%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

Los resultados de la heurística 4 se muestran en la Figura 7.19. Para esta heurística, se observa que todos los resultados de la heurística empeoran en menos de un 67% el mejor resultado absoluto Figura 7.19(b). La dispersión de los resultados de la heurística es mínima en torno al 12% para el mejor resultado relativo como para el absoluto. La media de empeoramiento de resultados respecto al mejor absoluto es de un 22%. La distribución en esta heurística como ocurría con la heurística 3, también se asemeja a una distribución normal.

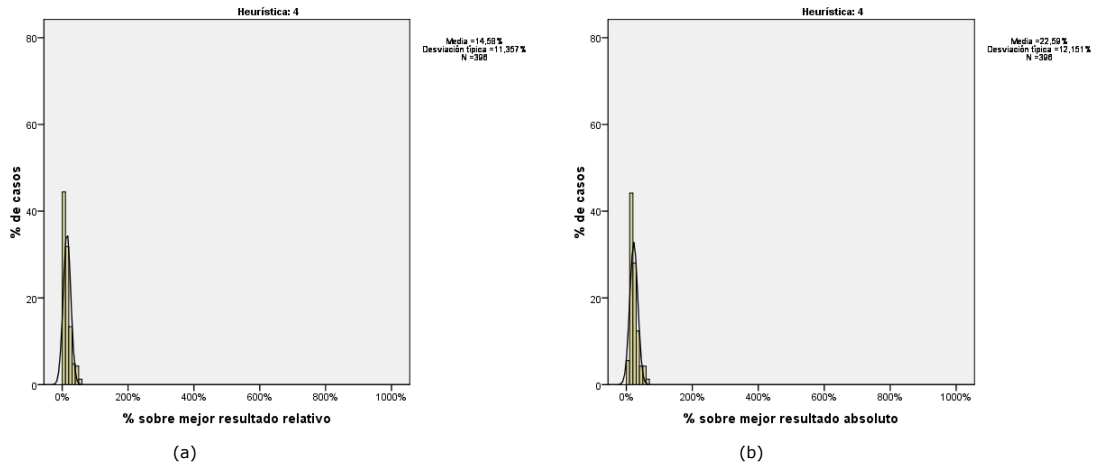


Figura 7.19 H4-88%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

Por tanto la heurística 4 es robusta, puesto que no se ve excesivamente afectada por los parámetros de diseño, y con buenos resultados aunque en general son ligeramente peores a los resultados de la heurística 3.

7.4.4 Heurísticas 8,9

Del análisis de máximos, mínimos y medias del apartado anterior, se observa que tanto la heurística 8 como la heurística 9 se encuentran en una posición bastante cercana en cuanto a medias de las heurísticas de mejores medias (heurística 3 y 4), y bastante alejadas de las heurísticas de muy malas medias (heurísticas 1,2,5). Sin embargo, en las siguientes gráficas (Figura 7.20, Figura 7.21) se muestra que la distribución de casos no es tan buena como se podría esperar.

Para la heurística 8 (Figura 7.20) se aprecian dos subdistribuciones. La primera que es la más numerosa con un 80% de los casos tendría una media aproximadamente del 40% respecto al mejor resultado absoluto, y la segunda con aproximadamente un 20% de los casos tiene una media en torno al 170%. Así se aprecia la sensibilidad de la heurística a los parámetros, pues si están bien escogidos y los resultados se incluyen en la primera subdistribución, se pueden obtener muy buenos resultados. En global se observa cómo el 50% de los casos tienen un error menor igual al 40% respecto al mejor resultado absoluto.

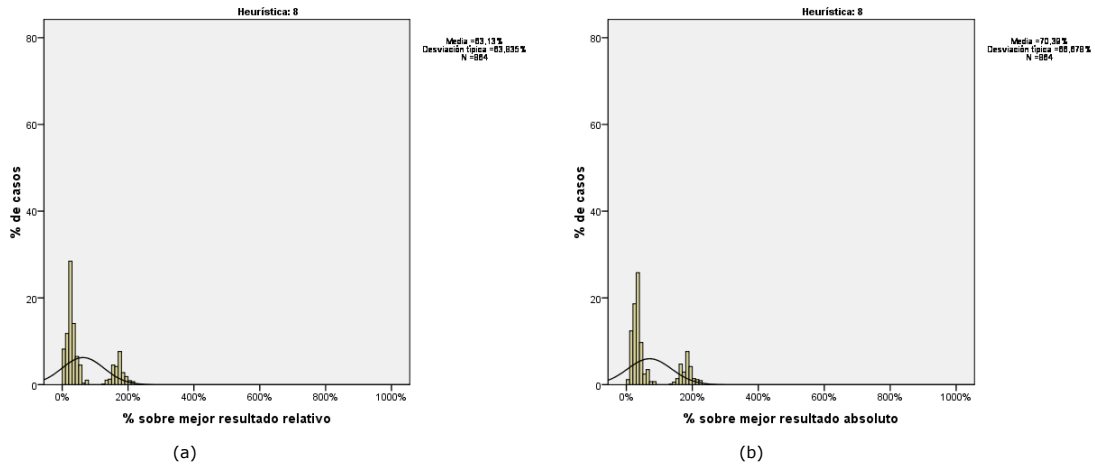


Figura 7.20 H8-88%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

En el caso de la heurística 9 (Figura 7.21), la dispersión de los valores también es considerable, aunque ligeramente menor que para la heurística 8, con una desviación típica en torno al 84% respecto al mejor resultado relativo y al mejor resultado absoluto. Sin embargo, siguiendo la misma tendencia que la heurística 8 aproximadamente el 70% de los casos sólo empeoran los mejores resultados en un 40% respecto al óptimo global. Parece que siempre que se definan correctamente sus parámetros de diseño va a ser una heurística que de buenos resultados, aunque en media ligeramente peores que la heurística 8. La distribución sigue siendo menos apuntada que la normal, esto es platicúrtica.

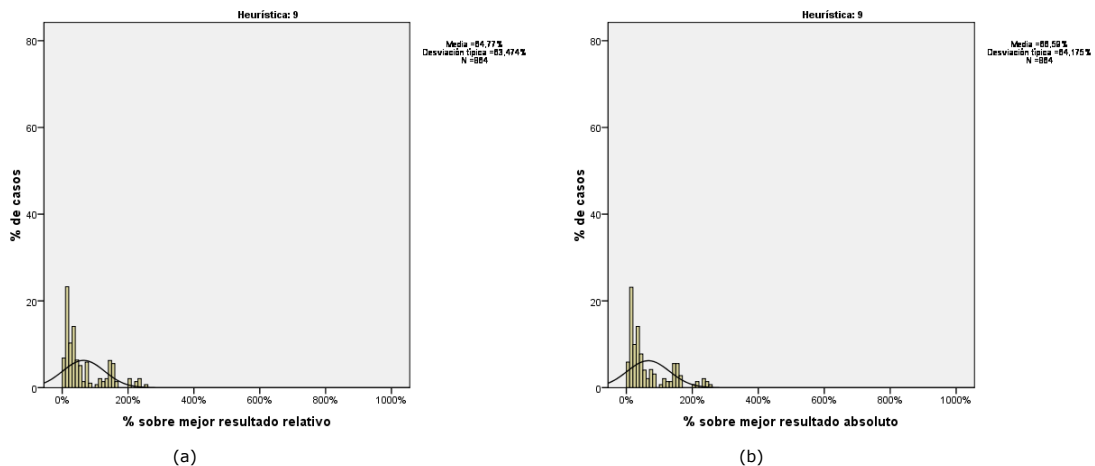


Figura 7.21 H9-88%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

7.4.5 Resumen Análisis

En la Tabla 7.7, se puede observar un claro resumen de las conclusiones que se han extraído en los apartados anteriores. Destaca claramente la heurística 3 con una media de resultados sobre el mejor resultado absoluto de un 9,6%, seguida por la heurística 4 con un 22,59% de media. Estas dos heurísticas son muy sencillas y emplean la idea de (Fransoo, 1993) de fabricar un producto hasta llegar a su nivel máximo, independientemente de lo que le ocurran al resto de productos del sistema (*no preemptive*). Como la utilización del sistema es alta, se permite abaratar tiempos y costes de *setup* a costa de posibles pérdidas de ventas. En el caso de la heurística 3, las cantidades a fabricar se calculan con la aproximación del algoritmo *DCC-ELSP-2P* mientras que la heurística 4 emplea el tiempo de ciclo *DCC-ELSP* embuclado.

Tabla 7.7. Resumen de resultados en % sobre su mejor resultado absoluto (88%)

% sobre mejor resultado absoluto (88%)			
Heurística	N	Media	Desv. típ.
1	396	368,20%	35,539%
2	396	371,91%	34,069%
3	396	9,60%	4,884%
4	396	22,59%	12,151%
5	396	497,49%	91,373%
6	864	391,98%	36,228%
7	864	397,43%	40,767%
8	864	70,39%	66,678%
9	864	66,59%	64,175%
Total	5436	239,74%	184,934%

Las heurísticas 8 y 9 se plantean como otras opciones para modelar este problema de coproducción deliberada y controlada con una utilización del sistema del 88%. Sus resultados en media no son tan buenos, del 70,39% para la heurística 8 y del 66,59% para la heurística 9. Sin embargo, considerando su distribución de casos tal y como se ha visto en el apartado anterior, con una correcta elección de parámetros, sus resultados pueden ser muy satisfactorios. Las heurísticas 8 y 9 son dos versiones de la heurística de la longitud de ciclo (Leachman y Gascon, 1988) maximizada planteadas por primera vez en este trabajo. Curiosamente el término maximizada de estas heurísticas se emplea porque en ambas también se incluye la aproximación debida a (Fransoo, 1993). Como se describió en detalle en el capítulo 5, estas heurísticas consideran un tiempo de ciclo dinámico que se recalcula en función de las holguras entre opciones de producción. Este tiempo de ciclo se

calcula de modo diferente en función de tratarse de la heurística 8 o 9. Con este nuevo tiempo de ciclo, se recalculan los niveles mínimos y máximos de inventarios y las cantidades a fabricar. A continuación, se lanza la cantidad establecida para la opción productiva de coproducción o no coproducción hasta su nivel máximo, sin importar el comportamiento de los inventarios del resto de ítems. Así se refuerza una idea presente en (Soman et al., 2006) que destacaba el posible buen funcionamiento de la heurística de (Fransoo, 1993) en sistemas de alta utilización.

De este modo, para resolver el caso planteado en esta tesis de (Bomberger, 1966) con una utilización del 88% modificado con coproducción, se puede emplear la heurística 3 y 4 sin importar en exceso cómo se definan los parámetros, considerando que la mejor combinación de parámetros esta detallada en el apartado de análisis de mejores resultados. O las heurísticas 8 y 9, siendo cautelosos en la elección de los parámetros de la heurística, considerando como mejor opción la combinación que se ha detalla en el apartado 7.3 de "Análisis de los mejores resultados". En la Tabla A.9 de los anexos que presenta las combinaciones de heurísticas y parámetros que presentan mejores resultados, se corrobora esta afirmación.

De estas conclusiones se derivan varias cuestiones. En primer lugar, parece oportuno analizar los parámetros de diseño de las heurísticas que mejores resultados presentan (heurísticas 3,4,8,9). Para realizar esto, puesto que ya se dispone de los mejores parámetros, tal y como se detalla en el apartado 7.3 de "Análisis de los mejores resultados" se consideran los valores medios. En segundo lugar, para ampliar el conocimiento del problema, sería interesante plantear otros problemas y aplicarles de nuevo las 9 heurísticas. Se plantea de acuerdo con (Oner y Bilgic, 2008) distintos escenarios en los que se modifica en ratio de utilización del sistema. Así, se replantea el problema de (Bomberger, 1966) con coproducción para una media y baja utilización. Con esto se podrá verificar si las heurísticas 3,4,8,9 continúan planteando buenos resultados para esos casos, o son relevadas por alguna de las otras heurísticas (1,2,5,6,7).

7.5 Análisis del comportamiento de los parámetros de diseño

7.5.1 Run Out

La Tabla 7.8 presenta el valor en media del % sobre el mejor resultado relativo para cada uno de los 3 modos de cálculo del *RO*, para las heurística que modelan adecuadamente el problema, esto es, las heurísticas 3,4,8,9.

Tabla 7.8. H3,4,8,9-88%. Análisis del RO con resultado en % sobre su mejor resultado relativo

% sobre mejor resultado relativo

Heurística	RO	Media	N	Desv. típ.
3	1	9,77%	132	4,795%
	2	9,35%	132	3,513%
	3	11,07%	132	4,210%
	Total	10,06%	396	4,258%
4	1	9,96%	132	9,186%
	2	7,64%	132	9,202%
	3	12,22%	132	9,354%
	Total	9,94%	396	9,412%
8	1	59,18%	288	58,655%
	2	51,16%	288	50,212%
	3	62,39%	288	60,592%
	Total	57,58%	864	56,797%
9	1	62,77%	288	56,187%
	2	64,26%	288	57,524%
	3	73,48%	288	65,794%
	Total	66,84%	864	60,103%

El mejor modo de calcular el RO de acuerdo con la media se sombrea en color gris. Se observa a partir de la Tabla 7.9 que en media para 3 de las 4 heurísticas, el modo de calcular el RO que da un resultado más barato es el modo 2, esto es:

$$RO = 2 \rightarrow RO_i = \frac{I_i - ss_i}{d_i} - c_i \quad (7.1)$$

Para la heurística 9 el mejor modo de cálculo es el 1, que dista un 4% en media y tiene un poco menos de desviación típica (60,8%) que el modo 2 (65%). Este modo es más sencillo:

$$RO = 1 \rightarrow RO_i = \frac{I_i}{d_i} \quad (7.2)$$

El modo 3, da unos resultados en media bastante malos en comparación con los otros modos de cálculo. Sólo en la Tabla 7.1, que presenta los mejores resultados

para todas las heurísticas, se observa que el mejor resultado para la heurística 5 se obtiene con este modo de cálculo. Pero este resultado, se encuentra alejadísimo del mejor resultado absoluto, por lo que resulta un valor del parámetro a desestimar.

$$RO = 3 \rightarrow RO_i = \frac{I_i(1-d_i/p_i)}{d_i} \quad (7.3)$$

Se puede concluir que el empleo del modo de cálculo del RO 2 para todas las heurísticas sería una buena opción en media, como se resume en la Tabla 7.9 que muestra el valor en media sobre el mejor resultado absoluto para cada uno de los 3 modos de cálculo del RO.

Tabla 7.9. Análisis global del RO

% sobre mejor resultado absoluto

RO	Media	N	Desv. típ.
1	50,97%	840	59,476%
2	48,92%	840	57,743%
3	56,19%	840	61,765%
Total	52,02%	2520	59,739%

7.5.2 Combinación

7.5.2.1 Heurísticas 3,4

La Tabla 7.10 presenta el valor en media del % sobre el mejor resultado relativo para cada uno de las 11 combinaciones de las heurísticas 3, 4. El detalle del significado de estas combinaciones se encuentra en el capítulo anterior, en el que se describía el diseño de la experimentación. Para la heurística 3, la mejor combinación en media es la número 8. La combinación 8 implica que la longitud en tiempo de la tirada de fabricación debe tener un mínimo de 6 horas. En el caso de que no sea así, el sistema se toma un período libre (Periodo Libre = 1). Para la heurística 4, la mejor combinación en media es la número 7. La combinación 7 implica, como la combinación 8, que la longitud en tiempo la tirada de fabricación debe tener un mínimo de 6 horas. Pero en el caso de que no sea así, el sistema no se toma un período libre (Periodo Libre = 0), estableciendo la fabricación del siguiente producto de acuerdo con la secuencia de RO.

Tabla 7.10. H3,4-88%.Resumen del análisis por heurística del parámetro combinación de acuerdo con resultado en % sobre su mejor resultado absoluto

% sobre mejor resultado relativo

Heurística	Combinación	Media	N	Desv. típ.
3	1	8,38%	36	2,488%
	2	9,18%	36	2,697%
	3	9,77%	36	3,521%
	4	11,70%	36	3,969%
	5	7,86%	36	2,000%
	6	8,09%	36	3,224%
	7	7,71%	36	1,511%
	8	6,31%	36	3,281%
	9	6,38%	36	1,669%
	10	20,32%	36	5,912%
	11	9,85%	36	2,632%
	Total		9,60%	396
4	1	5,71%	36	2,065%
	2	14,07%	36	5,766%
	3	11,55%	36	3,941%
	4	18,95%	36	6,129%
	5	4,96%	36	2,037%
	6	17,53%	36	7,946%
	7	3,60%	36	1,594%
	8	21,53%	36	5,920%
	9	5,66%	36	1,165%
	10	40,83%	36	7,407%
	11	15,94%	36	4,840%
	Total		14,58%	396

De acuerdo con la Tabla 7.10 se observa cómo para las heurísticas 3,4 la combinación 10 siempre da el peor resultado en media del % sobre su mejor resultado relativo por lo que parece descartable. Esta combinación consiste en que la longitud mínima de una tirada de fabricación ha de ser de un día, y en el caso de que se cumpla, se toma un periodo libre. Esto tiene sentido pues es la opción planteada de tirada mínima más amplia y que más puede desperdiciar utilización

de la máquina. Curiosamente, para el caso de no coproducción es justamente la opción encontrada en la literatura respecto a simulación revisada (Gascon et al., 1994; Leachman y Gascon, 1988; Soman et al., 2006).

A partir de la Tabla 7.11 resulta que en media para las 2 heurísticas la combinación que presenta un mejor resultado es la combinación 7.

Tabla 7.11. H3,4-88%. Análisis global del parámetro combinación con resultado en % sobre el mejor resultado absoluto

% sobre mejor resultado absoluto			
Combinación	Media	N	Desv. típ.
1	10,74%	72	3,338%
2	15,61%	72	8,021%
3	14,57%	72	6,179%
4	19,49%	72	9,509%
5	10,09%	72	3,053%
6	16,92%	72	10,945%
7	9,28%	72	2,250%
8	18,17%	72	12,955%
9	9,71%	72	3,667%
10	35,50%	72	16,793%
11	16,95%	72	8,232%
Total	16,09%	792	11,311%

7.5.2.2 Heurísticas 8,9

En la siguiente Tabla 7.12 se detalla para cada heurística el valor en media del % sobre el mejor resultado relativo para todas las combinaciones. Para la heurística 8 la mejor combinación es la combinación 13, seguida muy de cerca por la combinación 15. La combinación 13 considera que, la mínima holgura que debe existir entre dos órdenes productivas para el recálculo del tiempo de ciclo es de 1 (*Cota Min Holgura*) día tal y como afirma (Leachman y Gascon, 1988). En el caso de que la holgura sea superior a 1 día, el sistema se tomará un periodo libre. La combinación 16 propuesta en esta tesis, afirma que la holgura mínima debe ser de 2 días puesto que este es el valor del parámetro de cota mínima para la holgura. De igual modo, en el caso de que la holgura sea superior a 1 día el sistema se tomará un periodo libre. Para la heurística 9 se plantea como mejor combinación la combinación 15 estando en este caso muy cercana en buen resultado la heurística

13. Es destacable como la siguiente combinación adecuada para las dos heurísticas es la combinación 17 que estableciendo de holgura mínima 4 días sigue forzando al sistema a tomarse un periodo libre si la holgura es mayor.

Tabla 7.12. H8,9-88%. Análisis global del parámetro combinación con resultado en % sobre su mejor resultado relativo

% sobre mejor resultado relativo

Heurística	Combinación	Media	N	Desv. típ.
8	12	67,65%	144	61,745%
	13	58,28%	144	65,999%
	14	67,65%	144	61,745%
	15	58,39%	144	65,882%
	16	67,65%	144	61,745%
	17	59,13%	144	65,832%
	Total	63,13%	864	63,835%
9	12	71,73%	144	60,623%
	13	57,60%	144	66,019%
	14	71,73%	144	60,623%
	15	56,27%	144	66,428%
	16	71,73%	144	60,623%
	17	59,59%	144	64,961%
	Total	64,77%	864	63,474%

Tabla 7.13 H8,9-88%. Análisis global parámetro combinación con resultado en % sobre mejor resultado absoluto

% sobre mejor resultado absoluto

Combinación	Media	N	Desv. típ.
12	74,37%	288	62,809%
13	62,34%	288	67,801%
14	74,37%	288	62,809%
15	61,72%	288	67,978%
16	74,37%	288	62,809%
17	63,79%	288	67,166%
Total	68,49%	1728	65,447%

La Tabla 7.13 presenta el valor en media sobre el mejor resultado relativo para cada una de las 11 combinaciones de las heurísticas 8,9. Se observa que en media para las 2 heurísticas las combinaciones que presentan un mejor resultado son las combinaciones 13,15,17.

7.5.3 Parámetro f (heurísticas 8,9)

La Tabla 7.14 presenta el valor en media del % sobre el mejor resultado relativo para los cuatro valores del parámetro corrector f para las heurísticas 8 y 9.

Tabla 7.14 H8,9-88%. Análisis global del parámetro combinación con resultado en % sobre su mejor resultado relativo

% sobre mejor resultado relativo				
Heurística	corrector f	Media	N	Desv. típ.
8	1	151,89%	216	17,968%
	3	19,39%	216	5,422%
	5	22,18%	216	13,321%
	7	36,84%	216	18,060%
	Total	57,58%	864	56,797%
9	1	153,84%	216	49,847%
	3	16,83%	216	9,228%
	5	34,39%	216	15,467%
	7	62,30%	216	22,274%
	Total	66,84%	864	60,103%

Se observa (Tabla 7.14) que en media para las 2 heurísticas la combinación que presenta un mejor resultado es el valor de f igual a 3. Esto implica que de acuerdo con el capítulo 5, que el ciclo mínimo de cada producto ha de ser calculado de acuerdo con la siguientes fórmulas (7.4),(7.5) donde f vale 3.

$$T_{op} = \alpha T_{pb} \tag{7.4}$$

$$\alpha = \max \left[\left(\frac{fp_i}{T_{pb}k_i d_i} \right)_{i \rightarrow pos(i)=1} \right], \min \left\{ 1, \min_w \left[\frac{RO_w - \sum_{pos(i)=pos(w)-1}^{pos(i)=1} c_i}{\sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} T_{pb}k_i d_i / \rho_i} \right] \right\} \tag{7.5}$$

Esta fórmula indica la aproximación empleada en la heurística 7 al ser la más sencilla. Para observar la influencia del parámetro f en el resto de heurísticas se remite al capítulo 5 en el que se describen en detalle las heurísticas.

En la siguiente Tabla 7.15 se observa como era de esperar que la elección del parámetro f con valor 3 resulta la más adecuada respecto al mejor resultado absoluto.

Tabla 7.15 H8,9-88%. Análisis global del parámetro combinación con resultado en % sobre el mejor resultado absoluto

% sobre mejor resultado absoluto

corrector f	Media	N	Desv. típ.
1	174,88%	432	31,570%
3	23,74%	432	14,497%
5	28,30%	432	11,702%
7	47,06%	432	19,711%
Total	68,49%	1728	65,447%

A partir de la observación de la Tabla 7.14 y Tabla 7.15 parece obvio que el valor de 1 para el parámetro f es descartable, por sus malos resultados en media sobre el mejor resultado relativo. El siguiente candidato a descartar sería el parámetro f igual a 7, considerando como muy aceptables los resultados conseguidos por el parámetro f igual a 5. En la Tabla 7.1, que presenta los mejores resultados para todas las heurísticas, se aprecia como el mejor resultado de la heurística 7 se alcanza con el parámetro f igual a 7, pero es un resultado muy alejado del óptimo absoluto. Las heurísticas 8 y 9 que obtienen su mejor resultado con un parámetro f igual a 3 o 5.

7.5.4 Reglas de selección de coproducción

Se han planteado tres tipos de reglas de selección de la coproducción basadas en la secuencia del *run out*, el valor del *run out* del coproducto y el valor del inventario del coproducto.

7.5.4.1 Análisis de la regla de la secuencia de RO

La Tabla 7.16 analiza el comportamiento de la regla de la secuencia de RO. Graciosamente, si se observa de manera particular los resultados para cada una de las heurísticas, para cada una de ellas es más apropiado un valor distinto de la

regla en valor medio. Sin embargo, las diferencias entre las opciones son mínimas.

Tabla 7.16 H3,4,8,9-88%. Análisis de la regla de la secuencia del RO con resultado en % sobre su mejor resultado relativo

% sobre mejor resultado relativo				
Heurística	Regla Secuencia RO	Media	N	Desv. típ.
3	1	8,93%	33	4,910%
	2	8,61%	33	3,208%
	3	7,68%	33	4,568%
	4	9,51%	33	3,477%
	Total	8,68%	132	4,110%
4	1	14,97%	33	11,762%
	2	14,63%	33	12,012%
	3	13,17%	33	11,982%
	4	12,42%	33	11,502%
	Total	13,80%	132	11,727%
8	1	62,49%	72	63,540%
	2	62,19%	72	56,190%
	3	63,52%	72	60,626%
	4	66,79%	72	58,843%
	Total	63,75%	288	59,574%
9	1	59,51%	72	54,821%
	2	60,16%	72	55,534%
	3	61,52%	72	56,405%
	4	60,31%	72	54,187%
	Total	60,38%	288	54,958%

A partir de la Tabla 7.17 se observa que la mejor opción en media puede ser cuando la regla toma un valor 1 o 2. El valor 1 significa coproducir siempre que el coproducto sea el siguiente en la secuencia de RO, y el valor 2 permite que el coproducto se encuentre hasta dos posiciones por detrás del producto que toca coproducir. Para estos dos valores de RO los resultados difieren sólo en la desviación típica.

Tabla 7.17 H3,4,8,9-88%. Análisis global de la regla de la secuencia del *RO* con resultado en % sobre el mejor resultado absoluto

% sobre mejor resultado absoluto

Regla Secuencia <i>RO</i>	Media	N	Desv. típ.
1	49,94%	210	55,922%
2	49,94%	210	53,249%
3	50,50%	210	55,857%
4	51,42%	210	54,559%
Total	50,45%	840	54,813%

7.5.4.2 Análisis de la regla del valor del *RO*

La Tabla 7.18 presenta que el mejor resultado respecto al mejor resultado absoluto se obtiene con el modo de cálculo 1, que de acuerdo con el capítulo anterior implica:

$$\text{Regla Valor } RO = 1 \rightarrow RO_j \leq T_j / 4$$

con T_j igual al valor del tiempo de ciclo del coproducto j .

Tabla 7.18 H3,4,8,9-88%. Análisis global de la regla del valor del *RO* con resultado en % sobre el mejor resultado absoluto

%sobre mejor absoluto

Regla Valor <i>RO</i>	Media	N	Desv. típ.
1	48,15%	210	54,090%
2	48,63%	210	54,749%
3	48,35%	210	54,211%
4	47,03%	210	53,310%
Total	48,04%	840	53,999%

La Tabla 7.19 que se presenta en la siguiente hoja, analiza el comportamiento de la regla del valor del *RO*. Salvo la heurística 4, el resto coinciden en tener mejor valor medio para la aproximación de la regla del valor del *RO* número 4. Sin embargo, las diferencias entre opciones no son excesivas.

Tabla 7.19 H3,4,8,9-88%. Análisis de la regla del valor del RO con resultado en % sobre su mejor resultado relativo

%sobre mejor relativo				
Heurística	Regla Valor RO	Media	N	Desv. típ.
3	1	9,32%	33	4,837%
	2	9,62%	33	6,166%
	3	9,40%	33	5,331%
	4	9,21%	33	5,330%
	Total	9,39%	132	5,376%
4	1	14,79%	33	11,064%
	2	15,15%	33	11,013%
	3	14,98%	33	10,499%
	4	14,91%	33	10,499%
	Total	14,96%	132	10,649%
8	1	57,14%	72	64,018%
	2	58,36%	72	65,667%
	3	58,37%	72	65,172%
	4	56,02%	72	62,994%
	Total	57,47%	288	64,141%
9	1	59,78%	72	50,695%
	2	59,60%	72	50,248%
	3	58,97%	72	49,384%
	4	57,73%	72	50,604%
	Total	59,02%	288	49,979%

7.5.4.3 Análisis de la regla del inventario del coproducto

La regla que se basa en los valores del inventario del coproducto es la que peores resultados presenta.

La Tabla 7.20 analiza el comportamiento de la regla del inventario del coproducto. Se observa de nuevo que salvo la heurística 4, el resto coinciden en la mejor opción en media como ocurría con la regla del valor del RO. Así para las heurísticas 3,8,9 el mejor valor medio considera una regla del inventario del coproducto con un valor de 1, siendo para la heurística 4 de valor 4. Esto guarda una total coherencia con la afirmación del apartado anterior, pues tanto la regla del

inventario del coproducto como del valor del RO , se encuentran en los mismos niveles, pues se refieren a la cantidad de coproducto que existe en el almacén.

La Tabla 7.21 presenta los resultados respecto al mejor resultado absoluto. Se aprecia el mejor resultado en media para la regla del inventario del coproducto con valor 1. Es decir, según esta regla es adecuado coproducir siempre que el inventario del coproducto tenga unos niveles bajos de inventario respecto a su máximo, concretamente su inventario I_j debe cumplir lo siguiente:

$$\text{Regla Stock Coproducto} = 1 \rightarrow I_j \leq s_j$$

Con s_j el nivel mínimo de inventario del coproducto j .

Tabla 7.20 H3,4,8,9-88%. Análisis de la regla del inventario del coproducto con resultado en % sobre mejor su resultado relativo

% sobre mejor resultado relativo				
Heurística	Regla Inventario Coproducto	Media	N	Desv. típ.
3	1	9,13%	33	5,003%
	2	11,26%	33	5,354%
	3	9,98%	33	4,128%
	4	12,49%	33	4,551%
	Total	10,71%	132	4,896%
4	1	15,39%	33	11,081%
	2	16,81%	33	12,417%
	3	13,97%	33	10,442%
	4	13,72%	33	12,987%
	Total	14,97%	132	11,706%
8	1	57,68%	72	65,399%
	2	67,33%	72	57,715%
	3	73,47%	72	66,758%
	4	74,14%	72	77,963%
	Total	68,16%	288	67,321%
9	1	57,09%	72	50,517%
	2	72,71%	72	79,989%
	3	81,26%	72	94,845%
	4	88,63%	72	86,776%
	Total	74,92%	288	80,253%

Tabla 7.21 H3,4,8,9-88%. Análisis global de la regla del inventario del coproducto con resultado en % sobre su mejor resultado absoluto

Regla Inventario Coproducto	Media	N	Desv. típ.
1	47,48%	210	54,467%
2	56,92%	210	64,776%
3	61,40%	210	75,898%
4	64,55%	210	77,190%
Total	57,59%	840	68,883%

7.6 Utilización 44% y 66%

Las 9 heurísticas van a ser de nuevo testeadas para otros ambientes para analizar si las heurísticas 3,4,8,9 siguen siendo buenas heurísticas o son remplazadas por alguna otra de las heurísticas restantes. Siguiendo a (Oner y Bilgic, 2008) se crean dos escenarios distintos con ratio de utilización bajo (44%) y medio (66%). Como se describe en detalle en el capítulo anterior, los escenarios se crean modificando el ratio de producción mientras se mantiene el valor de la demanda. Para comenzar el análisis, se considera interesante plantear en una gráfica el valor medio, máximo y mínimo de los costes en % sobre su mejor resultado relativo y absoluto para los dos escenarios (Figura 7.22, Figura 7.23). Los valores asociados a estas gráficas se muestran en la Tabla A.6 y la Tabla A.7 de los anexos.

Si se analiza en detalle la situación de las heurísticas, en cada uno de los ambientes de utilización, se puede afirmar lo siguiente. Para un ambiente de baja utilización, representado en la Figura 7.22(b), todas las heurísticas, salvo la heurística 5, serían capaces de modelar el sistema de una forma escasamente aceptable, ya que con una combinación adecuada de parámetros el resultado difiere sobre un 80% del óptimo. Esto puede resultar muy alejado, pero en el entorno en el que la heurística 5 llega a esta hasta un 2000% alejado del óptimo, sería relativamente aceptable. Del mismo modo, si se observa la Figura 7.22(a), que representa la dispersión dentro de la propia heurística, se observa como todas las heurísticas salvo la 4,5 y de algún modo la 2, apuntan a ser muy sensibles a los parámetros de diseño. Para analizar esto en detalle, se remite a los gráficos de distribución de casos de cada una de las heurísticas que se encuentran en los anexos. Para el nivel de utilización bajo del sistema, desde la Figura A.3 hasta la Figura A.11, para el nivel medio de utilización desde la Figura A.12 hasta la Figura A.20 de los anexos.

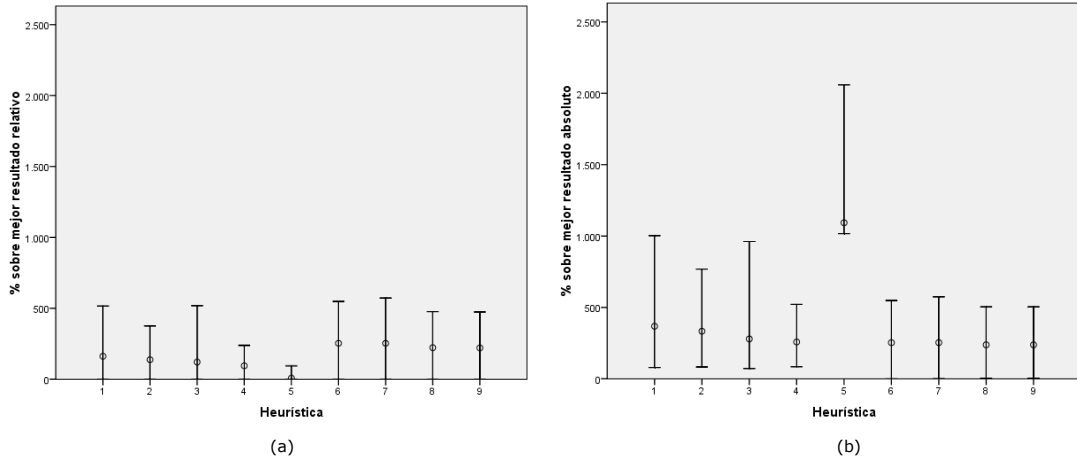


Figura 7.22 H1..9-44%. Análisis de medias, máximos y mínimos: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

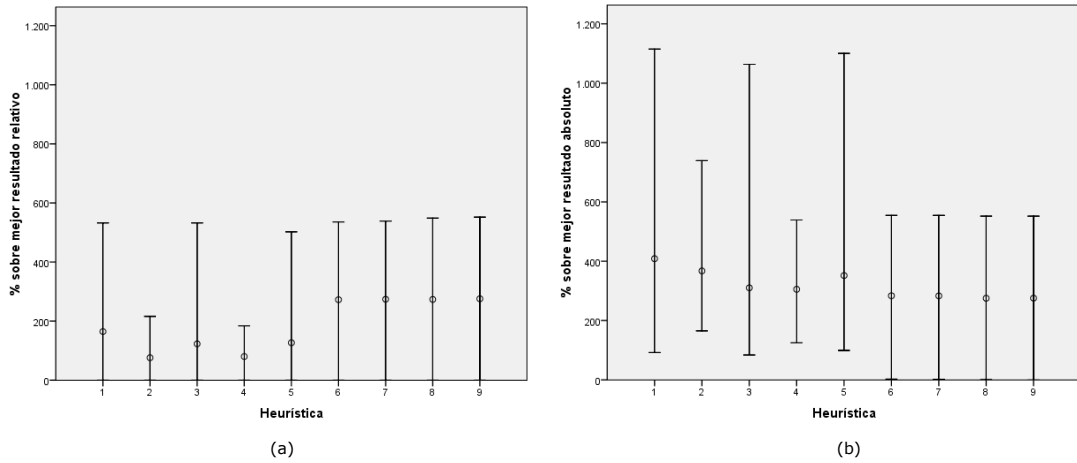


Figura 7.23 H1..9-66%. Análisis de medias, máximos y mínimos: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

A continuación, se presentan la Figura 7.24 y la Figura 7.25 que muestran los costes totales de los mejores resultados de cada heurística, divididos de acuerdo a los costes de almacenamiento, *setup* y pérdidas de ventas, para una baja y media utilización del sistema. Los valores para la generación de estas gráficas se encuentran en los anexos, en la Tabla A.10 y la Tabla A.11 respectivamente.

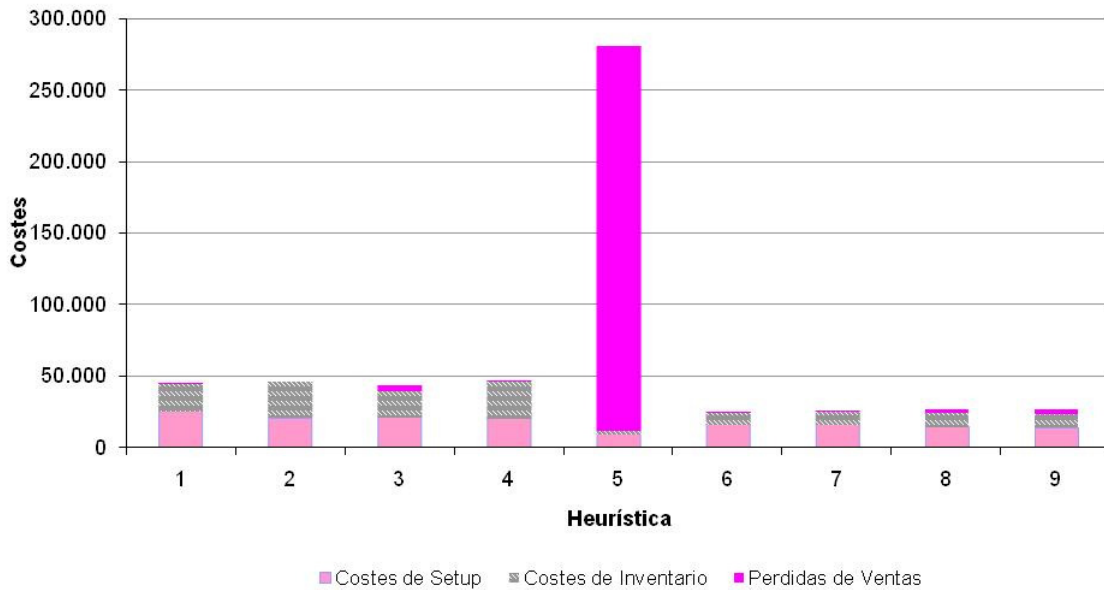


Figura 7.24 Distribución de los costes totales para las heurísticas (44%)

En la Figura 7.24, se observa el destacable mal comportamiento de la heurística 5 que es debido, tal y como ocurría en el escenario del 88%, a un mal modelado del problema que le introduce en un “chaotic spike” (Wilding, 1998) en el que los inventarios de los producto caen de manera exagerada, causando grandes pérdidas de ventas. Esto se debe a un sobrecontrol y sobreajuste del sistema. Se observa como las heurísticas 1,2,3,4, sin incurrir en significantes pérdidas de ventas, trabajan en niveles de inventarios superiores a las heurísticas 6,7,8,9. Para satisfacer la demanda, mantener unos niveles tan altos de inventarios almacenar, como muestran los costes de inventarios de las heurísticas 6,7,8,9. Esto nos da indicio de un incorrecto dimensionado de los costes de *setup* para el sistema. Como se aprecia en la Figura 7.24, los mejores resultados se corresponden con las heurísticas 6,7,8,9 que son las heurísticas, de acuerdo con el capítulo anterior, que recalculan en cada iteración el tiempo de ciclo para reajustar el sistema.

Para un ambiente de media utilización (66%), Figura 7.23(b), las heurísticas 1,3 pueden conseguir, con una adecuada combinación de parámetros, un resultado alejado del óptimo en un 85% aproximadamente de media. Sin embargo, las heurísticas 2,4,5 consiguen resultados muchos más alejados. Las únicas capaces de conseguir los mejores resultados son las heurísticas 6,7,8,9 como se detalla en la siguiente Figura 7.25 de costes totales, que muestra los mejores resultados de cada heurística. En cuanto a la dispersión de resultados, cuyos gráficos se pueden consultar en los anexos, destacar que de nuevo la alta sensibilidad a los parámetros de diseño de las heurísticas 1,3,6,7,8,9 respecto a su mejor resultado relativo. Mientras que se mantienen relativamente estables las heurísticas que siguen la aproximación de (Fransoo, 1993) con el tiempo de ciclo embuclado, esto es, las heurísticas 2,4.

En la Figura 7.25, de nuevo se observa el destacable mal comportamiento de las heurísticas 1,2,3,4,5 que disponen de unos costes de almacenamiento y de inventario en otras franjas, sensiblemente superiores a las de las heurísticas 6,7,8,9.

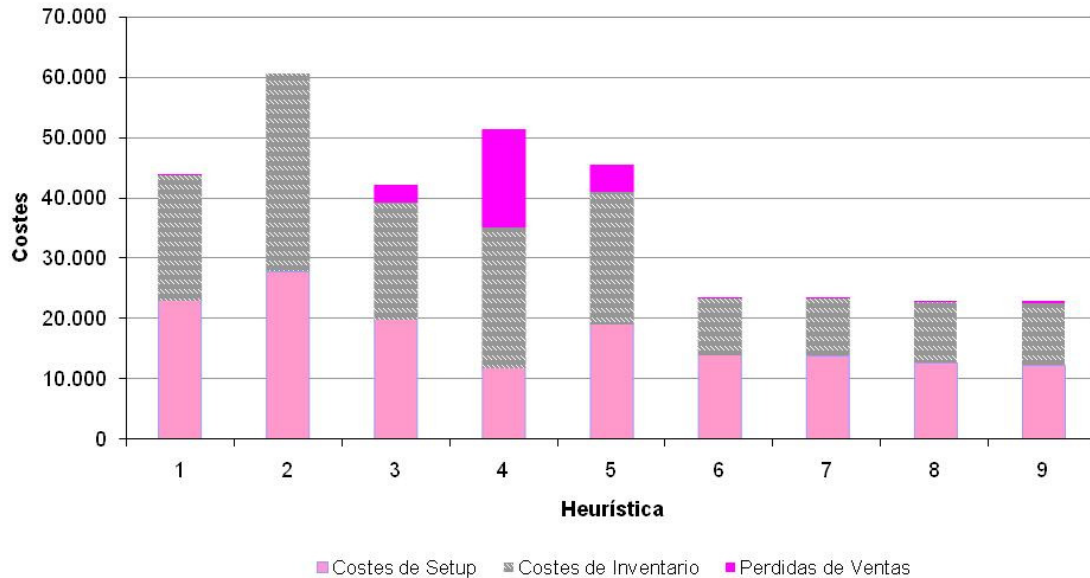


Figura 7.25 Distribución de los costes totales para las heurísticas (66%)

Se puede concluir que para obtener los mejores resultados las heurísticas a utilizar en ambos ambientes de utilización (44%, 66%) deberían ser las heurísticas 6,7,8,9. Esto es así, puesto que estas heurísticas son capaces de obtener resultados prácticamente iguales y muy cercanos al 0% sobre el mejor resultado absoluto. Sin embargo, se aprecia que en ambos ambientes y especialmente con una utilización del 66%, la dispersión de los valores para estas heurísticas 6,7,8,9 es muy elevada, como se observa en los anexos. Estas cuatro heurísticas parten de la idea de la longitud de ciclo dinámica de (Leachman y Gascon, 1988) modificada para incluir coproducción. El tiempo de ciclo se recalcula en cada iteración, hasta adaptarse a las nuevas circunstancias de inventario de los productos. Como se intuía, son heurísticas capaces de adaptarse adecuadamente al fenómeno de coproducción en distintos ambientes de utilización, especialmente las heurísticas 8 y 9. Las heurísticas 8 y 9 siguen la idea de (Fransoo, 1993) que permite el respeto de las cantidades de ciclo recalculadas (heurística *no preemptive*).

Si se comparan las conclusiones obtenidas, con los resultados obtenidos para el caso del 88%, en el que se recomendaban las heurísticas 3,4,8,9, se observa como aquí las heurísticas 3 y 4 no resultan adecuadas. Estas heurísticas son estáticas y no recalculan los tiempos de ciclo. Esto nos plantea de nuevo la consideración de la definición de los costes de *setup*. Tal y como se afirma en (Segerstedt, 1996) los costes de *setup* debieran depender de la limitación de capacidad del un sistema.

Así se intuye y se comprueba que cuando se disminuye la utilización del sistema (44%,66%) los costes de *setup* debieran reducirse para reequilibrar el sistema. En las siguientes gráficas, que comparan los costes para cada uno de los sistemas de utilización, la necesidad de emplear los costes de *setup* como regulador de la capacidad del sistema se muestra claramente.

En la siguiente Figura 7.26 se muestra la evolución de los costes de *setup* para ocho de las nueve heurísticas. En la Figura 7.27 se muestra la evolución de los costes de almacenamiento y en la Figura 7.28 de las pérdidas de ventas.

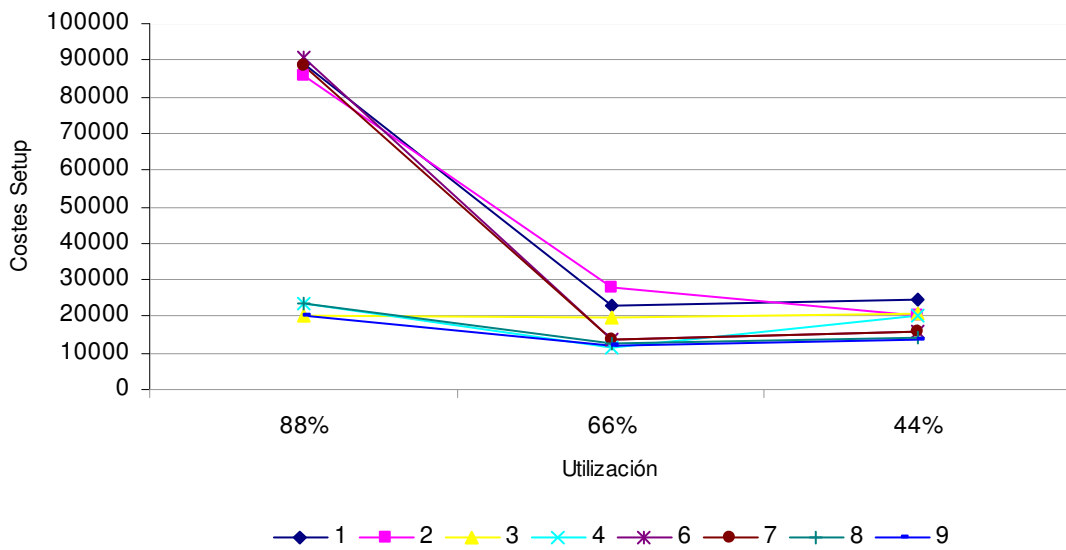


Figura 7.26 Costes de *setup* para las heurísticas (H1..9) y todas las utilizations (44%,66%,88%)

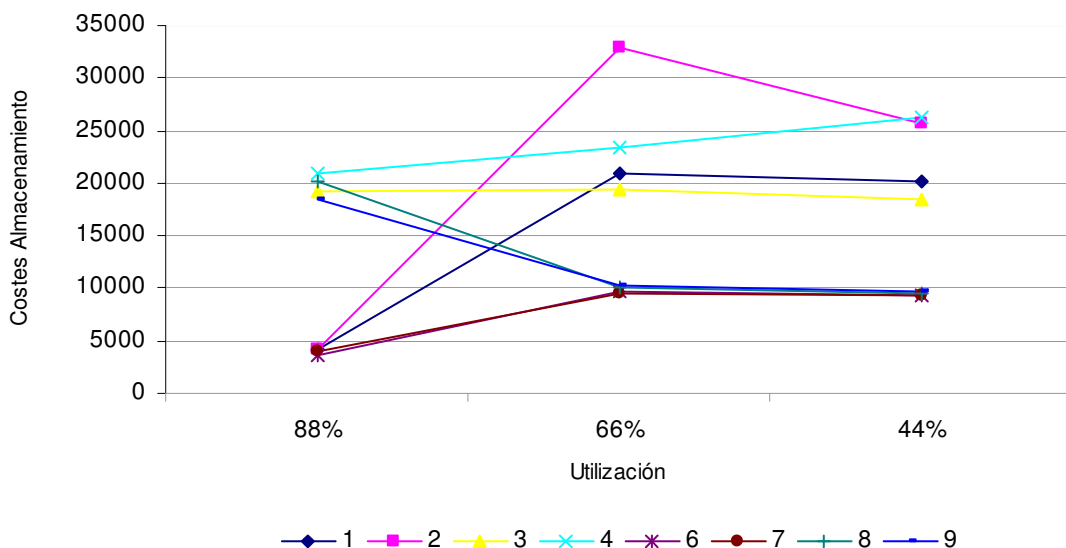


Figura 7.27 Costes de almacenamiento para las heurísticas (H1..9) y todas las utilizations (44%,66%,88%)

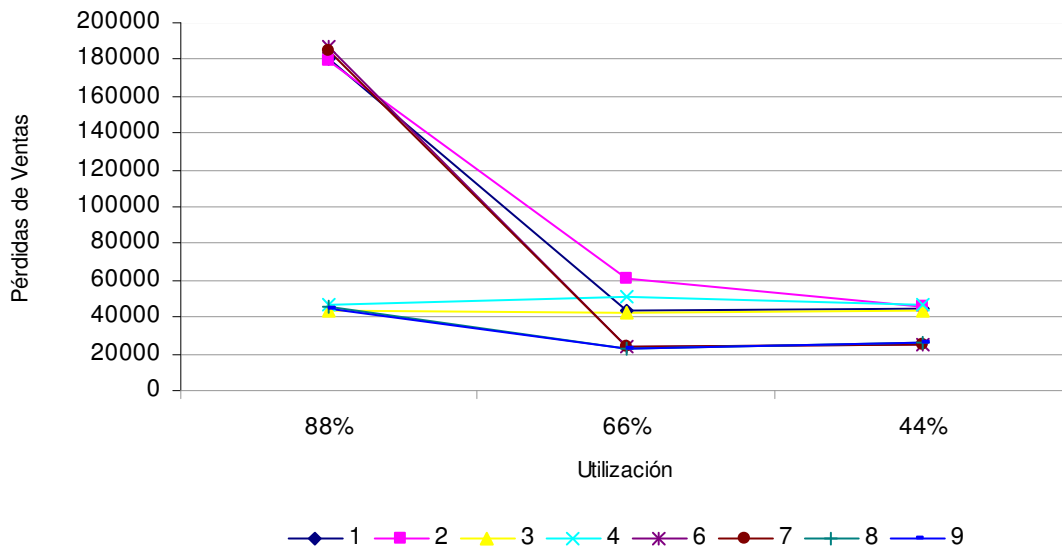


Figura 7.28 Pérdidas de Ventas para las heurísticas (H1..9) y todas las utilizaciones (44%,66%,88%)

Se considera adecuado obviar en las gráficas a la heurística 5 por su comportamiento anómalo. En la Tabla A.12 y la Tabla A.13 de los anexos se encuentra el resumen en % de costes sobre el mejor resultado absoluto para una baja y media utilización, respectivamente. A continuación se presentan las conclusiones obtenidas a partir de estas gráficas y tablas.

Las heurísticas 1 y 2 son heurísticas *preemptives*. Al disminuir la utilización de la instalación y estar las máquinas más libres, se observa un menor coste de setups que se traduce en un menor número de *setups*. Sin embargo, se observa que los costes de almacenamiento aumentan respecto a una mayor utilización. Esto es así, puesto que cada vez se lanza una orden productiva, se permite mantener su fabricación durante más tiempo, aunque se trate de una heurística *preemptiva*, porque los ratios de producción han aumentado. Además, como se comentó en el capítulo 6 (apartado 6.5.1), los niveles de inventario aumentan en promedio ligeramente, de acuerdo con las fórmulas del modelo *DCC-ELSP-2P*, en caso de menores utilizaciones del sistema.

Las heurísticas 6 y 7 también son *preemptives*, aunque disponen de un tiempo de ciclo dinámico. Por esto, aunque siguen la misma tendencia que la heurística 1,2 respecto a disminución de *setups*, los inventarios no aumentan tanto al disminuir la utilización, porque se recalculan en cada iteración.

En las heurísticas 3,4 que son heurísticas no *preemptives*, se aprecia una disminución de los *setups*, mientras que los inventarios prácticamente se mantienen estables. Estas heurísticas siempre permiten que los inventarios lleguen

a su nivel máximo, una vez se lanza una orden de fabricación. Como se ha comentado que los niveles de inventarios entrada del programa aumentan ligeramente al disminuir la utilización. Los *setups* disminuyen puesto que al ir más rápido las máquinas, se pueden permitir la opción de tener periodos de descanso. En las heurísticas 8,9 que son las que mejor resultados presentan en todos los ambientes de utilización, se aprecia en las figuras como disminuyen los costes de *setup* y los niveles de inventarios. Al ser heurísticas no *preemptives*, pero con tiempo de ciclo dinámicos, se permite ahorrar en tiempos de *setup* al llegar una orden hasta su nivel máximo cada vez que se lanza. Además, este nivel máximo, esta recalculado de acuerdo con el tiempo de ciclo dinámico, que se adapta a las nuevas circunstancias de utilización. De este modo, los niveles de inventario no se disparan al disminuir la utilización de la instalación, como ocurría en las heurísticas 1,2,5,6.

De acuerdo con Figura 7.28, como era de esperar, al aumentar el ratio de fabricación de la instalación y mantener la misma demanda, las pérdidas de ventas disminuyen al disminuir la utilización del sistema.

7.7 Conclusiones

Para resolver el problema planteado en esta tesis, esto es, el problema de (Bomberger, 1966) con un ratio de utilización del 88% con coproducción deliberada y controlada de dos productos, son varias las combinaciones de heurísticas que se podrían emplear. Si el sistema se fuera a mantener estable en su ratio de utilización, las heurísticas a emplear serían la heurística 3 y 4 en su mejor combinación, de acuerdo con la Tabla 7.1, para conseguir los mejores resultados. Estas heurísticas son muy sencillas de implementar en la práctica, puesto que fabrican las cantidades calculadas de acuerdo con unos niveles máximos y mínimos de inventario, de manera no *preemptive*. Las órdenes de fabricación que se están ejecutando en un periodo, no se alteran por desequilibrios en los inventarios de los productos que no se están fabricando en ese momento. Sin embargo, si se trabaja en un ambiente en el que no se pueda garantizar la estabilidad, ni en la demanda ni en los ratios de fabricación de los productos, lo más adecuado es el empleo de unas heurísticas flexibles y capaces de adaptarse a las nuevas exigencias de utilización del sistema. Para responder a esto, las heurísticas 8,9 son las más adecuadas en los tres ambientes de utilización testados (alto, medio, bajo). Estas heurísticas son más elaboradas y exigen un recálculo dinámico del tiempo de ciclo pero esto permite que se adapten mejor a las nuevas situaciones. Mediante esta reconsideración del tiempo de ciclo se permite mitigar el efecto del desequilibrio de los costes de *setup* al modificar el ratio de utilización de la instalación. Realmente, los costes de *setup*, en un sistema con coproducción o sin coproducción, debieran ser una medida de la capacidad del sistema y a la vez, permitir la regulación de la misma. Este planteamiento enunciado en (Segerstedt, 1996) para la gestión de

inventario en entorno multi-etapa que afirmaba que los costes de *setup* son el resultado de la limitación de la capacidad del sistema, ha aparecido claramente en este problema *DCC-ELSP-2P*. Esto abre una línea de investigación interesante tanto en el *DCC-ELSP-2P* como en el mismo *ELSP* clásico ya que la idea de unos costes de *setup* ajustables a la capacidad del sistema ha sido ligeramente tratada.

Respecto a los parámetros de diseño resulta curioso, cómo, en ocasiones, heurísticas con parámetros distintos tienen un comportamiento que permite considerar que son heurísticas distintas. Como conclusiones globales a los parámetros de diseño, destacar cómo los mejores resultados se obtienen, en mayoría y en media, para todas las heurísticas con el modo de cálculo del *RO* definido en (Gascon et al., 1994). Esto implica que el *RO* es el tiempo previsto hasta que el inventario de la pieza i , denominado I_i , caiga hasta un punto de relanzamiento igual al inventario de seguridad ss_i , más la demanda prevista d_i , durante el tiempo de cambio de partida c_i . Es curioso que, aunque autores, como (Soman et al., 2006), señalan en sus trabajos que con el *RO* calculado de acuerdo con (Gascon et al., 1994) se obtendrían mejores resultados en sus trabajos no lo emplean. El modo de cálculo del *RO* más extendido (Segerstedt, 1999) se define como el cociente entre el inventario de un producto y su demanda.

En los artículos (Leachman et al., 1991; Leachman y Gascon, 1988) en los cuáles se consideran heurísticas semejantes a la 1,2,3,4,5 pero sin coproducción, se restringe que una orden fabricación debe tener una duración mínima de un periodo, esto es, un día (8 horas). En caso de que esto no ocurra, se enuncia que el sistema se toma un periodo libre, considerado de 1 día sin fabricar. Sin embargo, como se ha analizado en este capítulo, exigir esa mínima duración resulta demasiado exigente y empeora mucho los resultados en el caso de coproducción deliberada y controlada. Además, en el caso de que no se cumpla, esta longitud mínima de *run* de producción, no debe dejarse siempre de un periodo. La mejor opción para los sistemas estudiados, resulta al restringir la duración de la mínima tirada de fabricación a 6 días y sino se cumple, en general en media, no dejar un periodo sin fabricar, sino escoger el siguiente producto en la secuencia de *RO*. Con esta tirada mínima de fabricación de 6 días, se permite que en un periodo se puedan incluir los *setup* de al menos 6 productos producidos de manera aislada (ítem 5,7,8,9) de los 10. En el caso de coproducir, el conjunto se reduce por la propia definición del tiempo de *setup* de coproducción (máximo entre los productos) a los productos 7,8,9. Esto, podría de algún modo justificar la necesidad de una longitud de tirada mínima más reducida. También se ha de considerar en este punto que, algo distinto sería que los autores (Gascon, 1988; Gascon et al., 1994), hubieran incluido en su mínimo tiempo de fabricación de un periodo, el tiempo de *setup*, pero esto no se hace explícito en ningún caso. Pudiera pues, resultar interesante trabajar en el mismo *ELSP* clásico sin coproducción para comprobar las distintas opciones de longitud mínima de fabricación y de la opción de tomarse o no un periodo libre.

Para las heurísticas 6,7,8,9 que se basan en la idea de (Leachman y Gascon, 1988) de recálculo del tiempo de ciclo, el parámetro de cota de holgura mínima (*Cota Min Holgura*) entre dos órdenes productivos para el recálculo del tiempo de ciclo, presenta distintos valores. En algunos casos, se exige que dure 1 día tal y como afirmaba (Leachman y Gascon, 1988) en su heurística inicial, aunque aumentar esta duración a 2 o 4 no empeora en exceso los resultados. El parámetro que comparten todas las opciones, es que en el caso de que se cumpla esa cota mínima en la holgura exigida, el sistema debe tomarse un periodo libre sin fabricar. Esto coincide con lo afirmado en (Leachman y Gascon, 1988) para el sistema sin coproducción, algo que tiene sentido, porque al coproducirse realmente estamos ahorrando utilización del sistema. El valor del parámetro f que permite limitar tiempos de ciclo demasiado pequeños y que es planteado en (Leachman y Gascon, 1988), sin informar acerca de los posibles valores que debiera tener, presenta para este sistema con coproducción deliberada y controlada un mejor resultado par f igual a 3.

Para finalizar, se considera adecuado extraer conclusiones del estudio las reglas de coproducción. Es conveniente recordar, que estas reglas permitían el reajuste del sistema para la coproducción deliberada en el caso de las variaciones estocásticas estacionarias de la demanda. Para el primer grupo de heurísticas, esto es, las heurísticas más sencillas y las más estáticas, 1,2,3,4,5, los mejores resultados apuntan a reglas de coproducción con amplios márgenes, a excepción de la heurística 1. Además la regla más intuitiva, que se basa en la secuencia de las ordenes de producción, presenta mejores resultados para 3 de las 5 heurísticas y lo que es más importante para las heurísticas 3 y 4, que son las que mejores resultados globales presentan. Concretamente, permite que el coproducto se encuentre hasta 4 posiciones por detrás del producto a fabricar. Al emplear unas franjas tan amplias para la coproducción, realmente no se está restringiendo apenas el sistema, permitiendo que las opciones teóricas planteadas de acuerdo con el algoritmo *DCC-ELSP-2P* se cumplan.

Sin embargo, para las heurísticas más complejas 6,7,8,9 que en cada iteración reajustan el tiempo de ciclo, se observa cómo las reglas de coproducción son más restrictivas. Las reglas basadas en la secuencia, permiten que el coproducto pareja del producto a fabricar, se encuentre hasta en la segunda posición en la secuencia del *RO*. Las reglas basadas en el inventario del coproducto (cantidad o tiempo de ciclo), que por definición son más amplias que las basadas en la secuencia, permiten que el coproducto se encuentre por encima de su nivel mínimo o un $\frac{3}{4}$ de su tiempo de ciclo. Comentar que para la heurística 8 se permite libertad en las reglas de coproducción siempre que se basen en el valor del *RO*, aunque si la regla se basa en el inventario del coproducto sigue cumpliendo la proposición de franjas estrechas. Esta moderación en las reglas se justifica del siguiente modo: se trata de unas heurísticas que por su propia definición reajustan su tiempo de ciclo considerando los inventarios de *DCC-ELSP-2P* y de todos los productos, pero en

caso de que este muy ajustado lo mayoran de acuerdo con un parámetro f que vemos que para las mejores combinaciones tiene un valor de 3,5 o 7. En ocasiones este tiempo de ciclo podría resultar en cantidades de fabricación demasiado amplias, de modo que el sistema debiera restringirse empleando de nuevo franjas moderadas. De nuevo las reglas basadas en la secuencia del RO aparecen en dos de las cuatro ocasiones, una de ellas en las que mejores resultados presenta de estas heurísticas complejas.

Con todo esto se puede concluir que, empleando las heurísticas adecuadas con los parámetros correctos, se consigue resolver adecuadamente el fenómeno de coproducción deliberada y controlada, consiguiendo un equilibrio entre los costes de *setup* y de inventario. Así como, que resultaría interesante hacer un estudio similar al que se ha hecho para el problema $DCC-ELSP-2P$ para el caso del $ELSP$ clásico sin coproducción, ya que los resultados curiosos han sido considerables.

Capítulo 8

Conclusiones

8.1 Introducción

En este último capítulo de la tesis se recogen las conclusiones obtenidas tras la realización del trabajo. Para ello se considera adecuado resumir por capítulo cada una de las conclusiones extraídas. A lo largo de la tarea de estudio que se ha realizado, se han tenido que ir tomando decisiones, dejando muchas líneas de investigación para futuros trabajos. Así, se pretende finalizar esta tesis doctoral presentando las más interesantes.

8.2 Resumen de Conclusiones

En el capítulo 1, se presenta el objetivo de la tesis doctoral, esto es, realizar un análisis y modelado del problema de programación de producción con coproducción controlada y deliberada (*DCC - Deliberate Controlled Coproduction*), en el contexto del sector de los proveedores del automóvil, que se asimila al problema *ELSP - Economic Lot Scheduling Problem*. Así mismo, forma parte del objetivo de la tesis la definición de diferentes metodologías y algoritmos para resolverlo de manera satisfactoria.

En el capítulo 2, se describen en detalle aquellos aspectos relevantes de la Programación de Producción en empresas suministradoras del Sector del automóvil que afectan directamente al problema planteado en esta tesis, esto es la coproducción deliberada y controlada. La demanda en este sector es relativamente fiable y constante aunque se ve afectada por los continuos cambios de reingeniería y la característica de un servicio de *racks* completos. El sistema productivo a modelar se caracteriza por unos considerables tiempos y costes de cambio de partida o *setup*. Estos tiempos de *setup* pueden depender o no depender de la

secuencia de producción. La capacidad del sistema suele estar muy ajustada, y está afectada por el fenómeno de apilado de inventario debido a los desajustes de calendario. Los costes de almacenamiento del producto deben considerarse y dependen del volumen de las piezas. En una máquina se produce una pieza aunque también pueden aparecer procesos alternativos o de combinación de productos (coproducción). Los inventarios que se consideran son inciertos puesto que las salidas y las entradas de material son continuas, así como los controles de calidad. De este modo, es necesario decidir que se ha de fabricar en cada momento y como se ha de hacer, sabiendo que el coste de los retrasos/adelantes es diferente según sea su proceso y el del cliente, así como la distancia entre ambos, los costes de almacenamiento de los productos y los costes de preparación de la máquina.

Con todo esto considerando las hipótesis del problema *ELSP (Economic Lot Scheduling Problem)* de acuerdo con (Bomberger, 1966; Madigan, 1968) que se presentan a continuación parece que no es una mala consideración asumir que el problema de programación de la producción para los proveedores del automóvil se asemeja al problema *ELSP (Vidal-Carreras et al., 2008b)*.

- Solo un producto puede ser producido al mismo tiempo
- Existe un coste de *setup* constante y un tiempo de *setup* constante asociados a la producción de cada producto. Los costes y tiempos de *setup* dependen solo del producto que se va a producir (son independientes de la secuencia de producción)
- El ratio de demanda de cada producto es conocido y constante a lo largo de todo el horizonte de planificación. Este horizonte de planificación es infinito y en él toda la demanda debe ser satisfecha
- El ratio de producción de cada producto es conocido y constante
- Para cada producto el coste variable total es la suma del coste de *setup* y el coste de almacenamiento del inventario.

Sin embargo, el fenómeno estudiado en el sector de los proveedores del automóvil y que es el eje fundamental de esta tesis, esto es, la coproducción, presenta una importante modificación a este problema *ELSP*. Concretamente afecta a la primera hipótesis (Vidal-Carreras et al., 2008c) puesto que la coproducción consiste en que la máquina puede producir más de un producto de manera simultánea. Como ejemplo destacar la coproducción deliberada y controlada que aparece en la industria de producción de piezas del automóvil en general. Los automóviles contienen muchas partes simétricas para el lado izquierdo y derecha del vehículo (retrovisores, puertas, faros, etc). Estos procesos de producción son a menudo diseñados para producir la parte izquierda y la parte derecha al mismo tiempo. Esta situación no parece ser un problema cuando se producen piezas para un coche

nuevo. Sin embargo, las mismas instalaciones de fabricación se utilizan para producir piezas de repuesto para reemplazar las piezas dañadas. Por lo tanto, la demanda de los productos que son coproducidos puede ser diferente. Así, es claro que en estos procesos se dispone de información de los parámetros asociados al proceso de coproducción (costes, tiempos, ratios de coproducción...) y se permite decidir si se quiere lanzar el proceso de coproducción o realizar el producto de modo tradicional, esto es, sin coproducción. Como se ha descrito en el siguiente capítulo 3 de revisión de la literatura, la primera característica descrita se asocia con el control de la coproducción y la segunda a la elección/deliberación de la coproducción. Con todo esto parece adecuado denominar al problema de esta tesis *DCC-ELSP (Deliberate Controlled Coproduction - Economic Lot Scheduling Problem)*.

En el capítulo 3, se revisa la bibliografía relacionada con el problema *DCC-ELSP*, destacando como el problema descrito en esta tesis, no había sido presentado hasta la fecha en la literatura. Se define coproducción controlada como aquel fenómeno de coproducción en el que se conocen los parámetros asociados al proceso (ratio de producción, tiempos y costes). Se dice que es deliberada cuando se puede decidir fabricar con coproducción o independientemente cada producto (Vidal-Carreras y Garcia-Sabater, 2009). Se puede afirmar que es la presentación del problema pues solo se encuentra una referencia que parece estar en la misma línea (Deuermeyer y Pierskalla, 1978) pero desde un punto de vista radicalmente distinto. Así se distingue claramente entre las referencias encontradas que versan sobre coproducción no controlada y no deliberada (Bitran y Leong, 1995; Bitran y Dasu, 1992; Bitran y Gilbert, 1994; Bitran y Leong, 1992; Bitran y Yanasse, 1984; Gerchak et al., 1996; Nahmias y Moinzadeh, 1997; Oner y Bilgic, 2008; Ou y Wein, 1995) entre otras.

La coproducción deliberada y controlada se plantea en el Problema de Programación del Lote Económico (*ELSP*). En este modelo la demanda es conocida y determinista, y se pretende balancear el equilibrio entre los costes de almacenamiento y *setup* (Bomberger, 1966; Delporte y Thomas, 1977; Doll y Whybark, 1973; Elmaghraby, 1978). Por lo tanto, este problema queda definido como un sistema productivo en un entorno *ELSP* en el que dos productos se pueden coproducir o no en el equipo en un momento dado, conociendo sus parámetros asociados (*DCC-ELSP*).

En el capítulo 4, se presenta el algoritmo *DCC-ELSP-2P* para definir los parámetros que permiten minimizar los costes de producir dos productos *a* y *b*, con demanda no sustituible. Para evaluar los costes de producir se deben optimizar las cantidades de producto *a* fabricar. Se asume que el producto *a* cumple, $d_a/p_{ab} > d_b/p_{ba}$ siendo p_{ab} , ratio de producción para el producto *a* en coproducción *a+b*, p_{ba} ratio de producción para el producto *b* en coproducción *a+b*, y que la opción de coproducción más adecuada es producir *a* y *a+b*. Partiendo

de estas consideraciones se define un modelo de costes totales en función del tiempo de ciclo T , el número de veces n que se lanzará la fabricación del producto a y el número de veces m que se coproducirá $a+b$. Este modelo considera el coste del número de *setups* realizados y del coste de almacenamiento de los productos dentro de ese ciclo, y depende de tres variables, dos de ellas discretas. Para la resolución del mismo se restringe el problema con la incorporación de que $(n=1) \vee (m=1)$. Así, el modo de cálculo de los tamaños de ciclo T para cada una de las opciones será diferente. De acuerdo con esto, el problema se bifurca en dos modelos para los dos casos diferentes, $(n \geq 1, m = 1)$ y $(n = 1, m \geq 1)$. El valor de T que se obtenga de estos modelos será función de n o m según sea el caso. La dinámica de trabajo que integra estos dos modelos esta descrita en el algoritmo *DCC-ELSP-2P*. La solución planteada es intuitivamente encuadrable para dos productos en las aproximaciones del *ELSP*, ciclo común y periodo básico.

En este capítulo 4, también se ha presentado una aplicación numérica para mejorar la comprensión de la dinámica de los modelos. A partir de estos ejemplos se observa la importancia de la correcta deliberación de la coproducción puesto que aunque un juego de datos cumpla todos los supuestos, no siempre la mejor opción es la coproducción. La bondad de la opción de coproducción depende de la relación entre los costes de *setup* y de almacenamiento, ratios de producción y demandas. Se observa que cuanto más similares sean los parámetros el sistema más tiende a la coproducción. Sin embargo, si escogemos mal el modo de coproducir los productos los costes se disparan, tanto de inventario como de *setups*. Si nos apoyamos en el algoritmo *DCC-ELSP-2P* para decidir el mejor modo de coproducir, los ahorros en costes son considerables.

En el capítulo 5, se han descrito las heurísticas creadas para modelar el fenómeno de coproducción en el entorno del problema de programación del lote/periodo económico.

Algunas de las heurísticas planteadas son relativamente sencillas, mientras que otras resultan más elaboradas y complejas. El motivo de la inclusión de heurísticas aparentemente sencillas como podrían ser las heurísticas 1,2,3,4 es doble. Por una parte la posibilidad de un mejor entendimiento del comportamiento e influencia del fenómeno de la coproducción y por otra comprender el valor de añadir sofisticación en la reglas de programación. La heurística 1 es una regla sencilla puesto que los ítems son producidos inicialmente de acuerdo con su cantidad económica en coproducción de acuerdo con el algoritmo *DCC-ELSP-2P* pero persistiendo el cambio de producción a otro ítem en secuencia de *RO* cuando el inventario de algún ítem cae por debajo de un determinado nivel. La heurística 2, basada en (Doll y Whybark, 1973) esto es, con un tiempo de ciclo T empujado a partir del obtenido por el algoritmo *DCC-ELSP-2P*, es un poco más elaborada, puesto que, los ítems son producidos de acuerdo a su tamaño de ciclo objetivo calculado considerando todos los productos del sistema. Sin embargo la dinámica es la

misma que la heurística 1, de modo que un ítem se produce hasta que el inventario de otro ítem cae por debajo de un determinado nivel. Las heurísticas 3,4 basadas en la regla de (Fransoo, 1993) solo contemplan la producción de un ítem hasta su nivel de inventario máximo sin importarle el comportamiento del resto de los ítems. Así se puede afirmar que las dos primeras heurísticas 1 y 2 son políticas *preemptives (s,S)*, y las heurísticas 3, 4 son no *preemptives*.

La heurística 5 basada en (Vergin y Lee, 1978) se encuentra en una posición intermedia respecto a complejidad aunque en posteriores análisis en ocasiones se agrupa con las heurísticas 1,2,3,4 por similitud de comportamiento. Las heurísticas 6,7,8,9 que se basan en (Leachman y Gascon, 1988) si se pueden categorizar como las más elaboradas de este trabajo. Por todo esto se describen detalladamente en su correspondiente apartado del capítulo. Señalar tan sólo que partiendo de la base de una política multi-ítem (s,S) consideran unos tiempos de ciclo para cada una de las opciones productivas que son dinámicos en el tiempo. Estos tiempos de ciclo, que dependen de la holgura entre opciones productivas, son revisados periodo a periodo para poder responder a las diferencias entre los niveles de inventario planeados y los niveles de inventario reales así como los cambios en los ratios de demanda.

Las heurísticas planteadas permiten responder a las preguntas de qué fabricar, cómo fabricar y cuanto fabricar de los distintos productos con su opción productiva. Se han descrito las posibles variantes de las mismas, cuya eficiencia y eficacia será testeada a través de la simulación. El diseño de la misma se describe en el siguiente capítulo 6, y los resultados se muestran en el capítulo 7.

En el capítulo 6, se plantea que datos y parámetros van a condicionar la experimentación mediante la cual, se va a determinar cuál es la mejor heurística para el problema planteado. El problema es un sistema multi-ítem en el que para el 40% de los productos se considera coproducción deliberada y controlada en el entorno del *ELSP*. Los costes y tiempos de *setup* de los procesos de coproducción se consideran el máximo de los costes y tiempos de *setups* de la producción de cada producto de manera aislada, y los ratios de coproducción se consideran la mitad del valor de cada producto de manera aislada. Los casos a considerar resultado de las combinaciones factibles de los parámetros de diseño son numerosos, lo que exigirá una extensa experimentación. Además, existen parámetros que son específicos de las heurísticas y sólo se pueden aplicar a algunas de ellas. Sin embargo, se ha de destacar que han sido muchas más las combinaciones que se han experimentado y que no se presentan en esta tesis por no mejorar los resultados.

En el capítulo 7, se concluye que para resolver el caso concreto planteado en esta tesis, esto es, el problema de (Bomberger, 1966) con un ratio de utilización del 88% con coproducción deliberada y controlada de dos productos, son varias las

combinaciones de heurísticas que se podrían emplear. Para un sistema estable en su ratio de utilización, las heurísticas 3 y 4 son las que consiguen mejores resultados. Estas heurísticas son muy sencillas de implementar en la práctica, puesto que fabrican las cantidades calculadas de acuerdo con unos niveles máximos y mínimos de inventario, sin alterarse por desequilibrios en los inventarios de los productos que no se están fabricando en ese momento (*no preemptive*). Sin embargo, para sistemas en los que no se pueda garantizar la estabilidad, ni en la demanda ni en los ratios de fabricación de los productos, lo más adecuado es el empleo de unas heurísticas 8 y 9. Estas heurísticas son flexibles y capaces de adaptarse a las nuevas exigencias de utilización del sistema. Estas heurísticas son más elaboradas y exigen un recálculo dinámico del tiempo de ciclo pero esto permite que se adapten mejor a las nuevas situaciones. Mediante esta reconsideración del tiempo de ciclo se permite mitigar el efecto del desequilibrio de los costes de *setup* al modificar el ratio de utilización de la instalación. Realmente, los costes de *setup*, en un sistema con coproducción o sin coproducción, debieran ser una medida de la capacidad del sistema y a la vez, permitir la regulación de la misma. Este planteamiento enunciado en (Segerstedt, 1996) para la gestión de inventario en entorno multi-etapa que afirmaba que los costes de *setup* son el resultado de la limitación de la capacidad del sistema, ha aparecido claramente en este problema *DCC-ELSP-2P*. Esto abre una línea de investigación interesante tanto en el *DCC-ELSP-2P* como en el mismo *ELSP* clásico ya que la idea de unos costes de *setup* ajustables a la capacidad del sistema ha sido ligeramente tratada.

Respecto a los parámetros de diseño resulta curioso, cómo, en ocasiones, heurísticas con parámetros distintos tienen un comportamiento muy dispar. Como conclusiones globales a los parámetros de diseño, destacar cómo los mejores resultados se obtienen, en mayoría y en media, para todas las heurísticas con el modo de cálculo del *RO* definido en (Gascon et al., 1994). Esto implica que el *RO* es el tiempo previsto hasta que el inventario de la pieza i , denominado I_i , caiga hasta un punto de relanzamiento igual al inventario de seguridad ss_i , más la demanda prevista d_i , durante el tiempo de cambio de partida c_i . Respecto a la mínima tirada de fabricación que afecta a las heurísticas 1,2,3,4,5 la mejor opción para los sistemas estudiados, resulta al restringir la duración de la mínima tirada de fabricación a 6 días y sino se cumple, en general en media, no dejar un periodo sin fabricar, sino escoger el siguiente producto en la secuencia de *RO*. Con esta tirada mínima de fabricación de 6 días, se permite que en un periodo se puedan incluir los *setup* de al menos 6 productos producidos de manera aislada (ítem 5,7,8,9) de los 10. En el caso de coproducir, el conjunto se reduce por la propia definición del tiempo de *setup* de coproducción (máximo entre los productos) a los productos 7,8,9. Respecto al parámetro de cota de holgura mínima entre dos órdenes productivas para el recálculo del tiempo de ciclo de las heurísticas 6,7,8,9 que se basan en la idea de (Leachman y Gascon, 1988) presenta distintos valores. En algunos casos, se exige que dure 1 día tal y como afirmaba (Leachman y

Gascon, 1988) en su heurística inicial, aunque aumentar esta duración a 2 o 4 no empeora en exceso los resultados. El parámetro que comparten todas las opciones, es que en el caso de que se cumpla esa cota mínima de holgura exigida, el sistema debe tomarse un periodo libre sin fabricar. Esto coincide con lo afirmado en (Leachman y Gascon, 1988) para el sistema sin coproducción, algo que tiene sentido, porque al coproducirse realmente estamos ahorrando utilización del sistema. El valor del parámetro f que permite limitar tiempos de ciclo demasiado pequeños y que es planteado en (Leachman y Gascon, 1988), sin informar acerca de los posibles valores que debiera tener, presenta para este sistema con coproducción deliberada y controlada un mejor resultado par f igual a 3.

Del mismo modo, en el capítulo 7 se extraen conclusiones del estudio las reglas de coproducción, esto es, reglas basadas en la secuencia del RO , en el inventario del coproducto, y en el valor del RO . Estas reglas permitían el reajuste del sistema para la coproducción deliberada en el caso de las variaciones estocásticas estacionarias de la demanda. Para el primer grupo de heurísticas, esto es, las heurísticas más sencillas 1,2,3,4,5 y estáticas, los mejores resultados apuntan a reglas de coproducción con amplios márgenes, a excepción de la heurística 1. Además la regla más intuitiva, que se basa en la secuencia de las ordenes de producción, presenta mejores resultados para 3 de las 5 heurísticas y lo que es más importante para las heurísticas 3 y 4, que son las que como se ha comentado son las que mejores resultados globales presentan. Concretamente, se permite que el coproducto se encuentre hasta 4 posiciones por detrás del producto a fabricar. Al emplear unas franjas tan amplias para la coproducción, realmente no se está restringiendo apenas el sistema, permitiendo que las opciones teóricas planteadas de acuerdo con el algoritmo *DCC-ELSP-2P* se cumplan. Para las heurísticas más complejas 6,7,8,9 que en cada iteración reajustan el tiempo de ciclo, se observa cómo las reglas de coproducción son más restrictivas. Este reajuste en las reglas se justifica del siguiente modo: se trata de unas heurísticas que por su propia definición reajustan su tiempo de ciclo considerando los inventarios de *DCC-ELSP-2P* y de todos los productos, pero en caso de que este muy ajustado lo mayor internamente de acuerdo con un parámetro f que para las mejores combinaciones tiene un valor de 3,5 o 7. Así, en ocasiones este tiempo de ciclo podría resultar en cantidades de fabricación demasiado amplias, de modo que el sistema debiera volver a restringirse empleando franjas moderadas. De nuevo las reglas basadas en la secuencia del RO aparecen en dos de las cuatro ocasiones, una de ellas en las que mejores resultados presenta de estas heurísticas complejas.

Con todo esto se puede concluir que, empleando las heurísticas adecuadas con los parámetros correctos, se consigue resolver adecuadamente el fenómeno de coproducción deliberada y controlada, consiguiendo un equilibrio entre los costes de *setup* y de inventario. Así como, que resultaría interesante hacer un estudio similar al que se ha hecho para el problema *DCC-ELSP-2P* para el caso del *ELSP* clásico sin coproducción, ya que los resultados curiosos han sido considerables.

8.3 Líneas de Futuro

El fenómeno de coproducción deliberada y controlada presentado en esta tesis considera que dos productos, a y b , pueden producirse simultáneamente en una misma máquina. Pero, podría ocurrir que esos mismos productos tuvieran más opciones de coproducción. Podría plantearse el concepto de producto *comodín*, como aquel que puede acoplarse en varias combinaciones coproductivas. Por ejemplo se podría plantear la coproducción de a y b , y la coproducción de a y c , y de a y e . Otro enfoque podría ser plantear la coproducción de a y b , y la coproducción de a y c , y de b y c .

Además podría ocurrir que estos grupos de coproductos dejaran de ser sólo dos, lo que añadiría más complejidad al problema. Se podría plantear coproducción por ejemplo de 3 o 4 productos simultáneamente. Y aplicar de nuevo el concepto de producto *comodín*.

Así mismo, se ha considerado el problema *DCC-ELSP* de una sola etapa, y en la realidad industrial se aprecia que en muchas ocasiones el número de etapas es mayor, incluso con máquinas en paralelo.

Los ratios de producción al coproducir se han considerado que se reducen a la mitad. Sin embargo, se podría plantear otro porcentaje de disminución o que mantuviesen los ratios de la producción aislada. Del mismo modo se ha considerado que los costes y tiempos de *setup* son el máximo de los coproductos, se podría considerar que son un promedio, que se reducen o que se mejoran de acuerdo con distintos porcentajes.

La investigación del concepto de coste de *setup* es otra línea interesante, pues parece que en ocasiones no están bien planteados pues deberían depender de la capacidad sobrante de la máquina.

Se han analizado los datos de (Bomberger, 1966) puesto que aunque resultan un tanto peculiares, son los más tratados en el entorno del *ELSP*. Podrían testearse las heurísticas para otros conjuntos de datos más reales con distinta utilización del sistema. En ocasiones los tiempos de ciclo para los productos son muy extensos y excesivamente superiores, al de sus compañeros, por lo que parecería lógico suponer que estos productos deberían producirse bajo pedido y no contra inventario.

Se han planteado 9 heurísticas, que se podrían extender en número, para el problema de coproducción deliberada y controlada. Para mejorar su resultado y adecuación al fenómeno de coproducción se podrían plantear reglas de sincronía de ratio de cobertura o de inventarios entre coproductos. Estas heurísticas se podrían aplicar también a problemas de coproducción incontrolada en los que se disponga

de algún modo de datos históricos que nos permiten disponer de algún control sobre el proceso.

En las heurísticas planteadas, se ha establecido un momento (al principio del periodo) en el que se actualizan los niveles de inventario (y por tanto los ratios de cobertura). Se podría comprobar si existen discrepancias en el caso de que estos valores se actualizaran de manera más continua, con menos margen de tiempo, puesto que se abordaría el tema de la incertidumbre en los datos.

Los inventarios iniciales son una entrada en el problema y podrían condicionar los resultados de las heurísticas. Sería muy interesante investigar en detalle como responden las heurísticas en dependencia de los inventarios iniciales en el corto plazo. Además, el concepto de apilado de inventario (*stock piling*) que ocurre entre otros, en el sector de los proveedores del automóvil no ha sido considerado. Un modo de considerarlo podría ser aplicar un modelo de inventario (s, S) dinámico de modo creciente que pudiera realizar el apilado de stock. Por otra parte, la incertidumbre asociada a los recuentos periódicos de inventarios que modifican la situación teórica del inventario, también sería una línea muy interesante.

Se plantea como entrada una demanda estocástica estacionaria. Podríamos plantear la evolución de los resultados de las heurísticas frente a otros tipos de demanda.

El horizonte que se ha considerado al lanzar la simulación ha sido de 960 días. Podría plantearse como responden las heurísticas en diferentes plazos como se inició en (Vidal-Carreras et al., 2009), pues está relacionado, entre otros, con el problema *initialization bias o start-up problem* (Robinson, 2004), en castellano, el problema del sesgo inicial.

La sensibilidad que han mostrados ciertas heurísticas a los parámetros de diseño y a los datos de entrada para el problema del *DCC-ELSP* nos acerca directamente al tema de la complejidad. Además todo esto pudiera repetirse para el clásico problema *ELSP*. Sería una interesante línea retomar la investigación sobre el comportamiento de éstas y otras heurísticas en el problema clásico *ELSP*, pues a pesar de la extensa literatura publicada sobre él todavía pueden quedar muchos conceptos por investigar. Así que resultaría interesante hacer un estudio similar al que se ha hecho para el problema *DCC-ELSP-2P* para el caso del *ELSP* clásico sin coproducción ya que los resultados curiosos han sido considerables.

Bibliografía

AlFawzan, M. A.; AlSultan, K. S. (1997). Economic production quantity for a manufacturing system with a controllable production rate. *Production Planning & Control*, Vol. 8, nº. 7, pp. 678-685.

Allahverdi, A.; Gupta, J. N. D.; Aldowaisan, T. (1999). A review of scheduling research involving setup considerations. *Omega-International Journal of Management Science*, Vol. 27, nº. 2, pp. 219-239.

Allahverdi, A.; Ng, C. T.; Cheng, T. C. E.; Kovalyov, M. Y. (2008). A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research*, Vol. 187, nº. 3, pp. 985-1032.

Allen, S. J. (1990). Production rate planning for two products sharing a single process facility: a real world case study. *Production and Inventory Management*, Vol. 31, pp. 24-29.

Altioik, T.; Shiue, G. A. (1994). Single-Stage, Multiproduct Production Inventory Systems with Backorders. *IIE Transactions*, Vol. 26, nº. 2, pp. 52-61.

Altioik, T.; Shiue, G. A. (1995). Single-Stage, Multiproduct Production/Inventory Systems with Lost Sales. *Naval Research Logistics*, Vol. 42, nº. 6, pp. 889-913.

Arizono, I.; Yokoi, S.; Ohta, H. (1989). The Effects of Varying Production-Rates on Inventory Control. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 40, nº. 9, pp. 789-796.

Balkhi, Z. T.; Benkherouf, L. (1996). On the optimal replenishment schedule for an inventory system with deteriorating items and time-varying demand and production rates. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 30, nº. 4, pp. 823-829.

Ballou, R. H. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro*. Pearson Educación.

Bazaraa, M. S.; Sherali, H.; Shetty, C. M. (1979). *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*, 2nd edn. John Willey.

Ben-Daya, M.; Hariga, M. (2000). Economic lot scheduling problem with imperfect production processes. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, nº. 7, pp. 875-881.

Bhunia, A. K.; Maiti, M. (1997). Deterministic inventory models for variable production. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 48, nº. 2, pp. 221-224.

Bitran, G. B.; Leong, T. Y. (1995). Coproduction of Substitutable Products. *Production Planning & Control*, Vol. 6, nº. 1, pp. 13-25.

Bitran, G. R.; Dasu, S. (1992). Ordering Policies in An Environment of Stochastic Yields and Substitutable Demands. *Operations Research*, Vol. 40, nº. 5, pp. 999-1017.

Bitran, G. R.; Gilbert, S. M. (1994). Coproduction Processes with Random Yields in the Semiconductor Industry. *Operations Research*, Vol. 42, nº. 3, pp. 476-491.

Bitran, G. R.; Leong, T. Y. (1992). Deterministic Approximations to Coproduction Problems with Service Constraints and Random Yields. *Management Science*, Vol. 38, nº. 5, pp. 724-742.

Bitran, G. R.; Yanasse, H. H. (1984). Deterministic Approximations to Stochastic Production Problems. *Operations Research*, Vol. 32, nº. 5, pp. 999-1018.

Boctor, F. F.; Poulin, P. (2005). Heuristics for the N-product, M-stage, economic lot sizing and scheduling problem with dynamic demand. *International Journal of Production Research*, Vol. 43, nº. 13, pp. 2809-2828.

Bomberger, E. E. (1966). A dynamic programming approach to a lot size scheduling problem. *Management Science*, Vol. 12, nº. 11, p. 778.

Bourland, K. E.; Yano, C. A. (1997). A comparison of solution approaches for the fixed-sequence economic lot scheduling problem. *IIE Transactions*, Vol. 29, nº. 2, pp. 103-108.

Bouvard, F., Cesari, M., & Luciat-Labry, J. (2002). Retooling the way to profitable growth. McKinsey Research

Brander, P.; Forsberg, R. (2006). Determination of safety stocks for cyclic schedules with stochastic demands. *International Journal of Production Economics*, Vol. 104, n^o. 2, pp. 271-295.

Brander, P.; Leven, E.; Segerstedt, A. (2005). Lot sizes in a capacity constrained facility - a simulation study of stationary stochastic demand. *International Journal of Production Economics*, Vol. 93-94, pp. 375-386.

Bravo, D.; Rodriguez, E.; Medina, M. (2009). Nisin and lacticin 481 coproduction by *Lactococcus lactis* strains isolated from raw ewes' milk. *Journal of Dairy Science*, Vol. 92, n^o. 10, pp. 4805-4811.

Buzacott, J. A.; Ozkarahan, I. A. (1983). One and two stage scheduling of two products with distributed inserted idle time: the benefits of a controllable production rate. *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 30, pp. 675-696.

Carstensen, P. (1999). The economic lot scheduling problem - survey and LP-based method. *Or Spektrum*, Vol. 21, n^o. 4, pp. 429-460.

Chandrasekaran, C.; Rajendran, C.; Chetty, O. V. K.; Hanumanna, D. (2007). Metaheuristics for solving economic lot scheduling problems (ELSP) using time-varying lot-sizes approach. *European Journal of Industrial Engineering*, Vol. 1, n^o. 2, pp. 152-181.

Chang, Y. J. & Yao, M. J. (2009). A genetic algorithm for solving the economic lot scheduling problem with reworks, in *Eight International Conference on Information and Management Sciences*, California Polytechnic State Univ, pp. 294-306.

Chase, R. B.; Aquilano, N. J.; Jacobs, F. R. (2004). *Operations Management for Competitive Advantage*, 10th. McGraw-Hill.

Chen, P. S. (2002). The impact of time-varying demand and production rates on determining inventory policy. *Mathematical Methods of Operations Research*, Vol. 54, n^o. 3, pp. 395-405.

Cheng, T. C. E. (1991). An Economic Order Quantity Model with Demand-Dependent Unit Production Cost and Imperfect Production Processes. *IIE Transactions*, Vol. 23, n^o. 1, pp. 23-28.

Chiu, S. W.; Cheng, C. B.; Wu, M. F.; Yang, J. C. (2010a). An Algebraic Approach for Determining the Optimal Lot Size for Epq Model with Rework Process. *Mathematical & Computational Applications*, Vol. 15, n^o. 3, pp. 364-370.

Chiu, Y. S. P.; Chen, K. K.; Cheng, F. T.; Wu, M. F. (2010b). Optimization of the finite production rate model with scrap, rework and stochastic machine breakdown. *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 59, n^o. 2, pp. 919-932.

Darwish, M. A. (2008). EPQ models with varying setup cost. *International Journal of Production Economics*, Vol. 113, n^o. 1, pp. 297-306.

Davis, S. G. (1990). Scheduling Economic Lot Size Production-Runs. *Management Science*, Vol. 36, n^o. 8, pp. 985-998.

Delporte, C. M.; Thomas, L. J. (1977). Lot Sizing and Sequencing for N-Products on One Facility. *Management Science*, Vol. 23, n^o. 10, pp. 1070-1079.

Deuermeyer, B. L. (1979). Multi-Type Production System for Perishable Inventories. *Operations Research*, Vol. 27, n^o. 5, pp. 935-943.

Deuermeyer, B. L.; Pierskalla, W. P. (1978). By-Product Production System with An Alternative. *Management Science*, Vol. 24, n^o. 13, pp. 1373-1383.

Dixon, P. S.; Silver, E. A. (1982). A heuristic for the multi-item, single-level, limited capacity, lot-sizing problem. *Journal of Operations Management*, Vol. 2, pp. 23-29.

Dobson, G. (1987). The Economic Lot-Scheduling Problem - Achieving Feasibility Using Time-Varying Lot Sizes. *Operations Research*, Vol. 35, n^o. 5, pp. 764-771.

Dobson, G. (1992). The Cyclic Lot Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setups. *Operations Research*, Vol. 40, n^o. 4, pp. 736-749.

Dodin, B. (1984). Scheduling N-Products on A Single Facility with Back-Ordering and Fixed Terminal Inventory. *Infor*, Vol. 22, n^o. 4, pp. 317-342.

Dodin, B. (1985). Scheduling N-Products on A Single Facility with Allowed Backordering. *International Journal of Production Research*, Vol. 23, n^o. 2, pp. 329-344.

Dogramaci, A.; Panayiotopoulos, J. C.; Adam, N. R. (1981). The Dynamic Lot-Sizing Problem for Multiple Items Under Limited Capacity. *AIIE transactions*, Vol. 13, n^o. 4, pp. 294-303.

Doll, C. L.; Whybark, D. C. (1973). An iterative procedure for the single-machine multi-product lot scheduling problem. *Management Science*, Vol. 20, n^o. 1, pp. 50-55.

Drexl, A.; Kimms, A. (1997). Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, Vol. 99, n^o. 2, pp. 221-235.

Duenyas, I.; Tsai, C. Y. (2000). Control of a manufacturing system with random product yield and downward substitutability. *IIE Transactions*, Vol. 32, n^o. 9, pp. 785-795.

Eiamkanchanalai, S.; Banerjee, A. (1999). Production lot sizing with variable production rate and explicit idle capacity cost. *International Journal of Production Economics*, Vol. 59, n^o. 1-3, pp. 251-259.

Eilon, S. (1957). Scheduling for batch production. *Journal of Institute of Production Engineering*, Vol. 36, pp. 549-579.

Elhafsi, M.; Bai, S. X. (1997). The common cycle economic lot scheduling problem with backorders: Benefits of controllable production rates. *Journal of Global Optimization*, Vol. 10, n^o. 3, pp. 283-303.

Elmaghraby, S. E. (1978). The economic lot scheduling problem (ELSP): Review and extensions. *Management Science*, Vol. 24, n^o. 6, pp. 587-598.

Erlenkotter, D. (1990). Ford Whitman Harris and the economic order quantity model. *Operations Research*, Vol. 38, n^o. 6, pp. 937-946.

Evans, R. V. (1969). Inventory Control of By-Products. *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 16, n^o. 1, pp. 85-95.

Eynan, A. (2003). The benefits of flexible production rates in the economic lot scheduling problem. *IIE Transactions*, Vol. 35, n^o. 11, pp. 1057-1064.

Fransoo, J. C. (1993): *Production Control and demand management in capacited flow process industries. Ph.D. Thesis*, Technische Universiteit Eindhoven.

Fransoo, J. C.; Sridharan, V.; Bertrand, J. W. M. (1995). A Hierarchical Approach for Capacity Coordination in Multiple Products Single-Machine Production Systems with Stationary Stochastic Demands. *European Journal of Operational Research*, Vol. 86, nº. 1, pp. 57-72.

Fujita, S. (1978). Application of Marginal Analysis to the Economic Lot Scheduling Problem. *AIIE transactions*, Vol. 10, nº. 4, pp. 354-361.

Gallego, G. (1990). Scheduling the Production of Several Items with Random Demands in A Single Facility. *Management Science*, Vol. 36, nº. 12, pp. 1579-1592.

Gallego, G. (1993). Reduced Production-Rates in the Economic Lot Scheduling Problem. *International Journal of Production Research*, Vol. 31, nº. 5, pp. 1035-1046.

Gallego, G.; Moon, I. (1992). The Effect of Externalizing Setups in the Economic Lot Scheduling Problem. *Operations Research*, Vol. 40, nº. 3, pp. 614-619.

Gallego, G.; Roundy, R. (1992). The Economic Lot Scheduling Problem with Finite Backorder Costs. *Naval Research Logistics*, Vol. 39, nº. 5, pp. 729-739.

Gallego, G.; Shaw, D. X. (1997). Complexity of the ELSP with general cyclic schedules. *IIE Transactions*, Vol. 29, nº. 2, pp. 109-113.

Galvin, M. (1987). Economic lot scheduling problem with sequence-dependent setup costs. *Production and Inventory Management*, Vol. 28, nº. 1, pp. 96-105.

Garcia-Sabater, J. J., Cardos, M., & Garcia-Sabater, J. P. (2006a). Un algoritmo para la planificación de producción en un sistema en red de fabricación basado en SMA, in X Congreso de Ingeniería de Organización.

Garcia-Sabater, J. J.; Marin-Garcia, J. A. (2009). Facilitadores y barreras para la sostenibilidad de la mejora continua: Un estudio en proveedores del automóvil de la Comunidad Valenciana. *Intangible capital*, Vol. 5, nº. 2.

Garcia-Sabater, J. P. (2000): *Modelos, métodos y algoritmos de resolución del problema de secuenciación de unidades homogéneas en el sector del automóvil*, Departamento de Organización de Empresas, Economía Financiera y Contabilidad - Universidad Politécnica de Valencia.

Garcia-Sabater, J. P., Poler-Escoto, R., Rodriguez A., & Olcina J. (1999). Desarrollo de un modelo de programación de producción para un sistema contra inventario con múltiples líneas en paralelo, in III Jornadas de Ingeniería de Organización, Barcelona.

Garcia-Sabater, J. P.; Vidal-Carreras, P. I. (2010). Programación de producción en los proveedores del automóvil. *Revista Virtual Pro*, Vol. 104, p. 23.

Garcia-Sabater, J. P., Miralles, C., Andres, C., & Jamous, S. (2006b). Batch cyclic scheduling with setups in a automovil sector supplier. A case study, in XIII CLAIO. Congreso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa.

Gascon, A. (1988). The Lookahead Heuristic for Multi-Item Single-Machine Production Scheduling with Dynamic, Stochastic Demands. *Infor*, Vol. 26, nº. 2, pp. 114-126.

Gascon, A.; Leachman, R. C.; Lefrancois, F. (1994). Multi-item, single-machine scheduling problem with stochastic demands: a comparison of heuristics. *International Journal of Production Research*, Vol. 32, nº. 3, pp. 583-596.

Gaudreault, J.; Frayret, J. M.; Rousseau, A.; D'Amours, S. (2008). Combined planning and scheduling in a divergent production system with a co-production. Working Paper, Vol. DT-2006-JMF-1.

Geoffrion, A. M.; Graves, G. W. (1976). Scheduling Parallel Production Lines with Changeover Costs - Practical Application of A Quadratic Assignment-Lp Approach. *Operations Research*, Vol. 24, nº. 4, pp. 595-610.

Gerchak, Y.; Grosfeld-Nir, A. (1999). Lot-sizing for substitutable, production-to-order parts with random functionality yields. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 11, nº. 4, pp. 371-377.

Gerchak, Y.; Tripathy, A.; Wang, K. (1996). Co-production models with random functionality yields. *IIE Transactions*, Vol. 28, nº. 5, pp. 391-403.

Giri, B. C.; Moon, I.; Yun, W. Y. (2003). Scheduling economic lot sizes in deteriorating production systems. *Naval Research Logistics*, Vol. 50, nº. 6, pp. 650-661.

Glasse, C. R. (1968). Minimum Change-Over Scheduling of Several Products on 1 Machine. *Operations Research*, Vol. 16, nº. 2, pp. 342-352.

Goncalves, J. F.; Leachman, R. C.; Gascon, A.; Xiong, Z. K. (1994). A Heuristic Scheduling Policy for Multiitem, Multimachine Production Systems with Time-Varying, Stochastic Demands. *Management Science*, Vol. 40, n°. 11, pp. 1455-1468.

Goyal, S. K. (1997). Observation on the economic lot scheduling problem: Theory and practice. *International Journal of Production Economics*, Vol. 50, n°. 1, p. 61.

Graves, S. C. (1980). The Multi-Product Production Cycling Problem. *AIIE transactions*, Vol. 12, pp. 233-240.

Grosfeld-Nir, A.; Gerchak, Y. (2004). Multiple lotsizing in production to order with random yields: Review of recent advances. *Annals of Operations Research*, Vol. 126, n°. 1-4, pp. 43-69.

Gupta, D. (1992). On the Economic Lot Scheduling Problem with Backlogging - the Common Cycle Approach. *Operations Research Letters*, Vol. 12, n°. 2, pp. 101-109.

Gurgur, C. Z.; Altiok, T. (2008). Decentralized multi-product multi-stage systems with backorders. *IIE Transactions*, Vol. 40, n°. 3, pp. 238-251.

Haessler, R. W. (1979). Improved Extended Basic Period Procedure for Solving the Economic Lot Scheduling Problem. *AIIE transactions*, Vol. 11, n°. 4, pp. 336-340.

Haessler, R. W.; Hogue, S. L. (1976). A note on the single-machine multi-product lot scheduling problem. *Management Science*, Vol. 22, n°. 8, pp. 909-912.

Hahm, J.; Yano, C. A. (1995). The Economic Lot and Delivery Scheduling Problem - Powers of 2 Policies. *Transportation Science*, Vol. 29, n°. 3, pp. 222-241.

Hahn, C. K.; Duplaga, E. A.; Hartley, J. L. (2000). Supply-Chain Synchronization: Lessons from Hyundai Motor Company. *INFORMS*, Vol. 30, n°. 4, pp. 32-35.

Haji, A.; Haji, R.; Sajadifar, S. M. (2006). Lot sizing with non-zero setup times for rework. 2006 International Conference on Service Systems and Service Management, Vols 1 and 2, Proceedings pp. 267-271.

Haji, R.; Haji, A.; Sajadifar, M.; Zolfaghari, S. (2008). Lot sizing with non-zero setup times for rework. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, Vol. 17, n°. 2, pp. 230-240.

Hanssmann, F. (1962). *Operations-Research in Production and Inventory Control*. J. Wiley.

Harris, F. W. (1913). How many parts to make an once. *Factory, The Magazine of Management*, Vol. 10, n^o. 2, pp. 135-6-152.

Harris, F. W. (1990). How Many Parts to Make at Once (Reprinted from *Factory the Magazine of Management*, Vol 10, Page 135-136, 1913). *Operations Research*, Vol. 38, n^o. 6, pp. 947-950.

Hax, A. C.; Candea, D. (1984). *Production and Inventory Managemens*. Prentice-Hall.

Hsu, W. L. (1983). On the General Feasibility Test of Scheduling Lot Sizes for Several Products on One Machine. *Management Science*, Vol. 29, n^o. 1, pp. 93-105.

Hwang, H.; Kim, D. B.; Kim, Y. D. (1993). Multiproduct Economic Lot Size Models with Investment Costs for Setup Reduction and Quality Improvement. *International Journal of Production Research*, Vol. 31, n^o. 3, pp. 691-703.

Jamal, A. M. M.; Sarker, B. R. (1993). An Optimal Batch Size for A Production System Operating Under A Just-In-Time Delivery System. *International Journal of Production Economics*, Vol. 32, n^o. 2, pp. 255-260.

Johson, L.; Montgomery, D. (1974). *Operations Research in Production Planning, Scheduling and Inventory Control*. John Willey and Sons.

Jones, P. C.; Inman, R. R. (1989). When Is the Economic Lot Scheduling Problem Easy. *IIE Transactions*, Vol. 21, n^o. 1, pp. 11-20.

Karimi, B.; Ghomi, S. M. T. F.; Wilson, J. M. (2003). The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. *Omega-International Journal of Management Science*, Vol. 31, n^o. 5, pp. 365-378.

Karmarkar, U. S.; Schrage, L. (1985). The Deterministic Dynamic Product Cycling Problem. *Operations Research*, Vol. 33, n^o. 2, pp. 326-345.

Kelle, P.; Clendenen, G.; Dardeau, P. (1994). Economic Lot Scheduling Heuristic for Random Demands. *International Journal of Production Economics*, Vol. 35, n^o. 1-3, pp. 337-342.

Khouja, M. (1997). The scheduling of economic lot sizes on volume flexible production systems. *International Journal of Production Economics*, Vol. 48, nº. 1, pp. 73-86.

Khouja, M. (1999). A note on 'deliberately slowing down output in a family production context'. *International Journal of Production Research*, Vol. 37, nº. 17, pp. 4067-4077.

Khouja, M.; Mehrez, A. (1994). Economic Production Lot-Size Model with Variable Production-Rate and Imperfect Quality. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 45, nº. 12, pp. 1405-1417.

Khouja, M.; Michalewicz, Z.; Wilmot, M. (1998). The use of genetic algorithms to solve the economic lot size scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 110, nº. 3, pp. 509-524.

Khoury, B. N.; Abboud, N. E.; Tannous, M. M. (2001). The common cycle approach to the ELSP problem with insufficient capacity. *International Journal of Production Economics*, Vol. 73, nº. 2, pp. 189-199.

Kim, M.; Lee, T. N. (1989). A study on the capacited production lot sizing problem with probabilistic demand. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 15, pp. 109-116.

Laming, R. (1993). *Beyond Partnership Strategies for Innovation and Lean Supply*

Larrañeta, J.; Onieva, L. (1988). The Economic Lot-Scheduling Problem - A Simple Approach. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 39, nº. 4, pp. 373-379.

Larsen, C. (1997). Using a variable production rate as a response mechanism in the economic production lot size model. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 48, nº. 1, pp. 97-99.

Leachman, R. C.; Gascon, A. (1988). A Heuristic Scheduling Policy for Multi-Item, Single-Machine Production Systems with Time-Varying, Stochastic Demands. *Management Science*, Vol. 34, nº. 3, pp. 377-390.

Leachman, R. C.; Xiong, Z. K.; Gascon, A.; Park, K. (1991). Note - An Improvement to the Dynamic Cycle Lengths Heuristic for Scheduling the Multiitem, Single-Machine. *Management Science*, Vol. 37, nº. 9, pp. 1201-1205.

Leven, E.; Segerstedt, A. (2007). A scheduling policy for adjusting economic lot quantities to a feasible solution. *European Journal of Operational Research*, Vol. 179, nº. 2, pp. 414-423.

Lisbona, P.; Romeo, L. M. (2008). Enhanced coal gasification heated by unmixed combustion integrated with an hybrid system of SOFC/GT. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, nº. 20, pp. 5755-5764.

Lopez, M. A. N.; Kingsman, B. G. (1991). The Economic Lot Scheduling Problem - Theory and Practice. *International Journal of Production Economics*, Vol. 23, nº. 1-3, pp. 147-164.

Madigan, J. G. (1968). Scheduling A Multi-Product Single Machine System for An Infinite Planning Period. *Management Science*, Vol. 14, nº. 11, pp. 713-719.

Maes, J.; Vanwassenhove, L. N. (1991). Capacitated Dynamic Lotsizing Heuristics for Serial Systems. *International Journal of Production Research*, Vol. 29, nº. 6, pp. 1235-1249.

Magee, J. F.; Boodman, D. M. (1967). *Production Planning and inventory control*, Second. Mcgraw Hill.

Mallya, R. (1992). Multiproduct Scheduling on A Single-Machine - A Case-Study. *Omega-International Journal of Management Science*, Vol. 20, nº. 4, pp. 529-534.

Martínez Costa, C.; Olivella Nadal, J. (2010). Flexibilidad del Tiempo de Trabajo en la Industria del Automóvil mediante el Uso de Cuentas de Horas. *Dirección y organización* nº. 34, pp. 73-78.

Maxwell, W. L. (1964). Scheduling of Economic Lot Sizes. *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 11, nº. 2, pp. 89-124.

Mcgillivray, A. R.; Silver, E. A. (1978). Some Concepts for Inventory Control Under Substitutable Demand. *Infor*, Vol. 16, nº. 1, pp. 47-63.

Miralles, C., Garcia-Sabater, J. P., Andres, C., & Pastor, R. (2005). Quantitative analysis of demand uncertainty environment. A case study from an automobile Seat manufacturer, in *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management - IESM'05*.

Moon, D. H.; Christy, D. P. (1998). Determination of optimal production rates on a single facility with dependent mold lifespan. *International Journal of Production Economics*, Vol. 54, nº. 1, pp. 29-40.

Moon, I. (1994). Multiproduct Economic Lot-Size Models with Investment Costs for Setup Reduction and Quality Improvement - Review and Extensions. *International Journal of Production Research*, Vol. 32, nº. 12, pp. 2795-2801.

Moon, I.; Gallego, G.; Simchilevi, D. (1991). Controllable Production-Rates in A Family Production Context. *International Journal of Production Research*, Vol. 29, nº. 12, pp. 2459-2470.

Moon, I.; Giri, B.; Choi, K. (2002a). Economic lot scheduling problem with imperfect production processes and setup times. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, nº. 6, pp. 620-629.

Moon, I.; Silver, E. A.; Choi, S. (2002b). Hybrid genetic algorithm for the economic lot-scheduling problem. *International Journal of Production Research*, Vol. 40, nº. 4, pp. 809-824.

Moon, I. K.; Hahm, J. H.; Lee, C. (1998). The effect of the stabilization period on the economic lot scheduling problem. *IIE Transactions*, Vol. 30, nº. 11, pp. 1009-1017.

Nahmias, S.; Moinzadeh, K. (1997). Lot sizing with randomly graded yields. *Operations Research*, Vol. 45, nº. 6, pp. 974-986.

Newson, E. F. P. (1975a). Multi-Item Lot Size Scheduling by Heuristic .1. with Fixed Resources. *Management Science Series B-Application*, Vol. 21, nº. 10, pp. 1186-1193.

Newson, E. F. P. (1975b). Multi-Item Lot Size Scheduling by Heuristic .2. with Variable Resources. *Management Science Series B-Application*, Vol. 21, nº. 10, pp. 1194-1203.

Nielsen, D. R.; Yoon, S. H.; Yuan, C. J.; Prather, K. L. J. (2010). Metabolic engineering of acetoin and meso-2,3-butanediol biosynthesis in *E. coli*. *Biotechnology Journal*, Vol. 5, nº. 3, pp. 274-284.

Nilsson, K.; Segerstedt, A. (2008). Corrections of costs to feasible solutions of economic lot scheduling problems. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 54, nº. 1, pp. 155-168.

Oh, H. C.; Karimi, I. A. (2001a). Planning production on a single processor with sequence-dependent setups part 1: determination of campaigns. *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 25, nº. 7-8, pp. 1021-1030.

Oh, H. C.; Karimi, I. A. (2001b). Planning production on a single processor with sequence-dependent setups. Part 2: campaign sequencing and scheduling. *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 25, nº. 7-8, pp. 1031-1043.

Oner, S.; Bilgic, T. (2008). Economic lot scheduling with uncontrolled co-production. *European Journal of Operational Research*, Vol. 188, nº. 3, pp. 793-810.

Ou, J. H.; Wein, L. M. (1995). Dynamic Scheduling of a production inventory system with by-products and random yield. *Management Science*, Vol. 41, nº. 6, pp. 1000-1017.

Robinson, S. (2004). *Simulation: The practice of model development and use*. John Wiley & Sons.

Rogers, J. (1958). A Computational Approach to the Economic Lot Scheduling Problem. *Management Science*, Vol. 4, nº. 3, pp. 264-291.

Sachon, M. & Albiñana, D. (2004). Sector español del automóvil: ¿preparado para el e-SCM?

Sarker, B. R.; Babu, P. S. (1993). Effect of Production Cost on Shelf-Life. *International Journal of Production Research*, Vol. 31, nº. 8, pp. 1865-1872.

Schweitzer, P. J.; Seidmann, A. (1991). Optimizing Processing Rates for Flexible Manufacturing Systems. *Management Science*, Vol. 37, nº. 4, pp. 454-466.

Schweitzer, P. J.; Silver, E. A. (1983). Mathematical Pitfalls in the One Machine Multiproduct Economic Lot Scheduling Problem. *Operations Research*, Vol. 31, nº. 2, pp. 401-405.

Segerstedt, A. (1999). Lot sizes in a capacity constrained facility with available initial inventories. *International Journal of Production Economics*, Vol. 59, nº. 1-3, pp. 469-475.

Segerstedt, A. (1996). A capacity-constrained multi-level inventory and production control problem. *International Journal of Production Economics*, Vol. 45, nº. 1-3, pp. 449-461.

Sheti, A. K.; Sheti, S. P. (1990). Flexibility in Manufacturing: A survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 2, n^o. 4, pp. 289-328.

Silver, E. A. (1989). Shelf-Life Considerations in A Family Production Context. *International Journal of Production Research*, Vol. 27, n^o. 12, pp. 2021-2026.

Silver, E. A. (1990). Deliberately Slowing Down Output in A Family Production Context. *International Journal of Production Research*, Vol. 28, n^o. 1, pp. 17-27.

Silver, E. A.; Pyke, D.; Peterson, R. (1998). *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*, 3rd edc. Wiley.

Singh, H.; Foster, J. B. (1987). Production Scheduling with Sequence Dependent Setup Costs. *IIE Transactions*, Vol. 19, n^o. 1, pp. 43-49.

Soman, C. A.; Pieter van Donk, D.; Gaalman, G. (2006). Comparison of dynamic scheduling policies for hybrid make-to-order and make-to-stock production systems with stochastic demand. *International Journal of Production Economics*, Vol. 104, n^o. 2, pp. 441-453.

Soman, C. A.; van Donk, D. P.; Gaalman, G. (2004a). Combined make-to-order and make-to-stock in a food production system. *International Journal of Production Economics*, Vol. 90, n^o. 2, pp. 223-235.

Soman, C. A., van Donk, D. P., & Gaalman, G. J. C. (2004b). Heuristics for multi-item, single machine scheduling problem with stochastic demand revisited.

Soman, C. A.; van Donk, D. P.; Gaalman, G. J. C. (2007). Capacitated planning and scheduling for combined make-to-order and make-to-stock production in the food industry: An illustrative case study. *International Journal of Production Economics*, Vol. 108, n^o. 1-2, pp. 191-199.

Sox, C. R.; Jackson, P. L.; Bowman, A.; Muckstadt, J. A. (1999). A review of the stochastic lot scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, Vol. 62, n^o. 3, pp. 181-200.

Stankard, M. F.; Gupta, S. K. (1969). A note on Bomberger's approach to lot size scheduling: Heuristic proposed. *Management Science Series A-Theory*, Vol. 15, n^o. 7, pp. 449-452.

Su, C. T.; Lin, C. W. (2001). A production inventory model which considers the dependence of production rate on demand and inventory level. *Production Planning & Control*, Vol. 12, n^o. 1, pp. 69-75.

Sun, H. N.; Huang, H. C.; Jaruphongs, W. (2010). The economic lot scheduling problem under extended basic period and power-of-two policy. *Optimization Letters*, Vol. 4, n^o. 2, pp. 157-172.

Taleizadeh, A.; Najafi, A. A.; Niaki, S. T. A. (2010a). Economic Production Quantity Model with Scrapped Items and Limited Production Capacity. *Scientia Iranica Transaction E-Industrial Engineering*, Vol. 17, n^o. 1, pp. 58-69.

Taleizadeh, A. A.; Wee, H. M.; Sadjadi, S. J. (2010b). Multi-product production quantity model with repair failure and partial backordering. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 59, n^o. 1, pp. 45-54.

Tang, O.; Teunter, R. (2006). Economic lot scheduling problem with returns. *Production and Operations Management*, Vol. 15, n^o. 4, pp. 488-497.

Taskin, Z. C.; Unal, A. T. (2009). Tactical level planning in float glass manufacturing with co-production, random yields and substitutable products. *European Journal of Operational Research*, Vol. 199, n^o. 1, pp. 252-261.

Taylor, G. D.; Taha, H. A.; Chowning, K. M. (1997). A heuristic model for the sequence-dependent lot scheduling problem. *Production Planning & Control*, Vol. 8, n^o. 3, pp. 213-225.

Teunter, R.; Kaparis, K.; Tang, O. (2008). Multi-product economic lot scheduling problem with separate production lines for manufacturing and remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, Vol. 191, n^o. 3, pp. 1241-1253.

Teunter, R.; Tang, O.; Kaparis, K. (2009). Heuristics for the economic lot scheduling problem with returns. *International Journal of Production Economics*, Vol. 118, n^o. 1, pp. 323-330.

Tomlin, B.; Wang, Y. (2008). Pricing and operational recourse in coproduction systems. *Management Science*, Vol. 54, n^o. 3, pp. 522-537.

Tunasar, C.; Rajgopal, J. (1996). An evolutionary computation approach to the economic lot scheduling problem Department of Industrial Engineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh.

Vannunen, J. A. E. E.; Wessels, J. (1978). Multi-Item Lot Size Determination and Scheduling Under Capacity Constraints. *European Journal of Operational Research*, Vol. 2, nº. 1, pp. 36-41.

Vergin, R. C.; Lee, T. N. (1978). Scheduling Rules for Multiple Product Single Machine System with Stochastic Demand. *Infor*, Vol. 16, nº. 1, pp. 64-73.

Vidal-Carreras, P. I. (2011): *Modelos y métodos para el problema de programación del lote económico con coproducción deliberada y controlada (DCC-ELSP)*, Departamento de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Valencia. España.

Vidal-Carreras, P. I.; Garcia-Sabater, J. P. (2009). Comparison of heuristics for an economic lot scheduling problem with deliberated coproduction. *Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol. 2, nº. 3, pp. 437-463.

Vidal-Carreras, P. I., Garcia-Sabater, J. P., Marín-García, J. A., & Garcia-Sabater, J. J. (2009). Estabilidad del Horizonte de Programación del Lote Económico con Coproducción, in 3rd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management - XIII Congreso de Ingeniería de Organización, R. Companys et al., eds., Servei de Comunicació i Promoció, UPC, p. 439.

Vidal-Carreras, P. I. & Garcia-Sabater, J. P. (2005). Estudio de la Problemática de Programación de la Producción en el sector del Automóvil. Aplicación a una red de fabricación, in IX Congreso de Ingeniería de Organización CIO, D. de la Fuente, I. Fernández-Quesada, & A. Gomez-Gomez, eds., Adingor, Universidad de Oviedo, p. 293.

Vidal-Carreras, P. I., Garcia-Sabater, J. P., Marín-García, J. A., & Garcia-Sabater, J. J. (2008a). Comparison of Scheduling Policies for a Production System with Parts Grouping, in 2nd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management - XII Congreso de Ingeniería de Organización, Universidad de Burgos, ed., Servicio de Publicaciones, Universidad de Burgos, p. 275.

Vidal-Carreras, P. I., Garcia-Sabater, J. P., Marín-García, J. A., & Garcia-Sabater, J. J. (2008b). ELSP variants: a review, in Universidad de Burgos, 2nd International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management - XII Congreso de Ingeniería de Organización, ed., Servicio de Publicaciones, Universidad de Burgos, p. 281.

Vidal-Carreras, P. I., Garcia-Sabater, J. P., Marín-García, J. A., & Garcia-Sabater, J. J. (2008c). Parts Grouping in ELSP, in 2nd International Conference on Industrial

Engineering and Industrial Management - XII Congreso de Ingeniería de Organización , Universidad de Burgos, ed., Servicio de Publicaciones, Universidad de Burgos, p. 291.

Wagner, B. J.; Davis, D. J. (2002). A search heuristic for the sequence-dependent economic lot scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 141, nº. 1, pp. 133-146.

Wagner, H. M.; Whitin, T. M. (1958). Dynamic-Programming and the Theory of the Firm. *Operations Research*, Vol. 6, nº. 4, p. 607.

Wilding, R. (1998). The supply chain complexity triangle: uncertainty generation in the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 28, nº. 8, pp. 599-616.

Wilson, R. H. (1934). A scientific routine for stock control. *Harvard Business Review*, Vol. 13, nº. 1, pp. 116-128.

Yan, K.; Kulkarni, V. (2008). Optimal inventory policies under stochastic production and demand rates. *Stochastic Models*, Vol. 24, nº. 2, pp. 173-190.

Yano, C. A.; Lee, H. L. (1995). Lot-Sizing with Random Yields - A Review. *Operations Research*, Vol. 43, nº. 2, pp. 311-334.

Yao, M. J. & Chang, Y. J. (2009). Solving the economic lot scheduling problem with multiple facilities in parallel using the time-varying lot sizes approach, in Eighth International Conference on Information and Management Sciences, p. F224.

Yao, M. J.; Elmaghraby, S. E. (2001). The economic lot scheduling problem under power-of-two policy. *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 41, nº. 10-11, pp. 1379-1393.

Zhu, X. Y.; Wilhelm, W. E. (2006). Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review. *IIE Transactions*, Vol. 38, nº. 11, pp. 987-1007.

Zipkin, P. H. (1991). Computing Optimal Lot Sizes in the Economic Lot Scheduling Problem. *Operations Research*, Vol. 39, nº. 1, pp. 56-63.

Anexos

A.1 Periodo Básico *ELSP*

De acuerdo con (Doll and Whybark, 1973) se establece el siguiente procedimiento iterativo para el cálculo del periodo básico.

Paso 1. Calcular del tiempo de ciclo de cada producto de acuerdo con periodo económico:

$$T_i = \sqrt{\frac{2A_i}{h_i d_i \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right)}} \quad i = 1..g \quad (\text{A.1})$$

Paso 2. Seleccionar el menor T_i , como la estimación inicial del periodo básico T_{pb} :

$$T_{pb} = \min(T_i) \quad (\text{A.2})$$

Paso 3. Determinar el múltiplo entero k_i^- y k_i^+ para cada producto, definido por:

$$k_i^- \leq T_i / T_{pb} \leq k_i^+ \quad (\text{A.3})$$

Paso 4. El valor k_i para cada producto se establece igual a k_i^- o k_i^+ , dependiendo de cual de los dos factores suponga el menor coste en la ecuación (A.4). Con $T_i^e = k_i T_{pb}$:

$$CT_i = \frac{1}{T_i^e} A_i + T_i^e h_i \frac{d_i}{2} \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right) \quad (\text{A.4})$$

Paso 5. Recalcular el periodo básico T_{pb} empleando las nuevas estimaciones de k_i de acuerdo con:

$$T_{pb} = \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^g A_i / k_i}{\sum_{i=1}^g h_i d_i \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right)}} \quad (\text{A.5})$$

Paso 6. Volver al paso 3 y recalcular los nuevos k_i^- y k_i^+ empleando el T_{pb} del paso 5 y considerando T_i del paso 1 para cada i . El procedimiento finaliza cuando las iteraciones consecutivas producen los mismos valores k_i en el paso 4.

Con este método se obtiene el periodo básico T_{pb} y los k_i de cada uno de los productos de modo que a partir de $T_i^e = k_i T_{pb}$ se calcula el tiempo de ciclo de cada uno de ellos.

La modificación de potencias de dos establecida en (Haessler, 1976) añade la condición de que se deben redondear a potencias de dos los factores obtenidos en el paso 3, k_i^- y k_i^+ . Así, el paso 3, debería completarse de acuerdo con:

- Donde $k_i^- = \{1, 2, 4, 8, 16, \dots\}$ es el múltiplo entero de potencias de dos más cercano de menor valor
- Donde $k_i^+ = \{1, 2, 4, 8, 16, \dots\}$ es el múltiplo entero de potencias de dos más cercano de mayor valor

A.2 Algoritmo DCC-ELSP-2P fijando T

Para estos valores de tiempo de ciclo en el caso de coproducción, se ha de buscar otra vez la condición (n, m) más económica, de acuerdo con el algoritmo DCC-ELSP-2P fijando el valor de T^* . El procedimiento para realizar esto se encuentra descrito en el siguiente Algoritmo 2.

Algoritmo 2. Algoritmo DCC-ELSP-2P fijando T

DATOS: Todos los parámetros

- 1: $i = 0$
- 2: $CT_{MIN} \leftarrow CT(T^* = T, n = 1, m = 1)$
- 3: *Do*
- 4: $i++$
- 5: $CT \leftarrow CT_n(T^* = T, n = 1, m = 1 + i)$
- 6: *if* ($CT_n < CT_{MIN}$) { $CT_{MIN} \leftarrow CT$ }

- 7: $CT \leftarrow CT_n (T^* = T, n = 1 + i, m = 1)$
- 8: $if (CT_m < CT_{MIN}) \{CT_{MIN} \leftarrow CT\}$
- 9: $While (CT < CT_{MIN})$
- 10: $Return \{CT_{MIN}, T^* = T, n, m \}$

A.3 Inventario de Seguridad

El inventario de seguridad de acuerdo con (Gascon, 1994), siendo c_i el tiempo de setup del producto i , y σ_{i1} , la desviación estándar de la demanda para el producto i en el siguiente periodo entrante, define el inventario de seguridad cómo:

$$ss_i = 3\sigma_{i1}\sqrt{c_i} \quad (A.6)$$

En (Leachman, 1988) se define el inventario de seguridad para permitir tres desviaciones de las desviaciones típicas de los errores del pronóstico de la demanda durante el tiempo de cambio.

En (Gascon, 1988) se investiga como afecta a los resultados de las heurísticas los distintos valores del factor del inventario de seguridad k de acuerdo con:

$$ss_i = k\sigma_{iL} \quad (A.7)$$

dónde σ_{iL} es la desviación estándar de los errores de pronóstico durante el tiempo de cambio L . De acuerdo con (Silver, 1998) que considera ítems individuales con demandas probabilísticas, el valor de k puede calcularse fácilmente de acuerdo con la medida de servicio empleada (costes de retraso explícitos, niveles de servicio, etc) y bajo la suposición de una distribución normal de los errores de pronóstico. En (Gascon, 1988) para adecuarse mejor al ambiente multi-item se considera adecuado evaluar el nivel de servicio de acuerdo con los distintos valores de k . Concretamente se testea $k=3$ y a continuación $k=6$ y $k=9$, para aquellos resultados con niveles de servicio inferiores al 100%.

A.4 Actualizar la cantidad pendiente de la demanda

Plantear en las heurísticas las opciones de actualizar o no la producción pendiente con la demanda, no presenta excesiva diferencia en media global (Tabla A.1). Así, para todos los experimentos se extraen conclusiones con la opción de no actualizar la cantidad a producir con la demanda.

Tabla A.1. Costes Totales actualizar o no la cantidad pendiente con la demanda para las 9 heurísticas.

Costes Totales			
Cantidad a producir actualizada con demanda	Media	N	Desv. típ.
1	158656,923	5436	87467,5876
0	149493,332	5436	81374,3112

Tabla A.2 Detalle del cálculo del RO de acuerdo con las tres opciones para los datos iniciales de Bomberger

Producto	Ratio de Producción (ud/dia)	Demanda (ud/dia)	Tiempo Setup (horas)	Inventario Inicial	Stock Seguridad	RO=1	RO=2	RO=3
1	30.000	400	1	26.807	849	67,0175	64,7711	66,1239
2	8.000	400	1	5.912	461	14,7800	13,5026	14,0410
3	9.500	800	2	11.903	905	14,8788	13,4972	13,6258
4	7.500	1.600	1	10.326	1.035	6,4538	5,6820	5,0770
5	2.000	80	4	1.579	149	19,7375	17,3812	18,9480
6	6.000	80	2	3.428	151	42,8500	40,7181	42,2787
7	2.400	24	8	1.974	56	82,2500	78,9032	81,4275
8	1.300	340	4	2.217	218	6,5206	5,3782	4,8152
9	2.000	340	6	7.202	401	21,1824	19,2537	17,5814
10	15.000	400	1	6.297	408	15,7425	14,5976	15,3227

Tabla A.3. Valores precalculados para la simulación (ratio de utilización 44%)

Producto	Opción Productiva	Cálculo T	T (días)	n	m	ss	s	S
1	1		167,53	*	*	849	899	67.017
2	2		75,11	1	2	404	504	15.595
3	3		75,11	1	2	809	1.009	22.468
4	4		19,53	*	*	1.035	1.235	25.814
5	5		89,05	1	1	125	165	4.320
6	6		89,05	1	1	125	165	8.694
7	7	<i>DCC-ELSP-2P</i>	204,33	*	*	56	80	4.935
8	8		20,52	*	*	218	388	5.542
9	9		61,48	*	*	401	656	18.005
10	10		39,26	*	*	408	458	15.742
2	23		75,11	1	2	404	504	15.526
3	23		75,11	1	2	809	1.009	41.780
5	56		89,05	1	1	125	165	7.289
6	56		89,05	1	1	125	165	7.289
1	1		228,34	*	*	991	1.041	91.160
2	2		57,09	1	2	353	453	15.543
3	3		57,09	1	2	705	905	17.215
4	4		28,54	*	*	1.251	1.451	37.377
5	5		114,17	2	1	91	131	2.795
6	6		114,17	2	1	141	181	8.710
7	7	<i>DCC-ELSP-2P</i> Embuclado	228,34	*	*	60	84	5.509
8	8		28,54	*	*	258	428	7.594
9	9		114,17	*	*	546	801	33.020
10	10		57,09	*	*	492	542	22.767
2	23		57,09	1	2	353	453	11.870
3	23		57,09	1	2	705	905	31.895
5	56		114,17	2	1	91	131	6.601
6	56		114,17	2	1	141	181	11.598

Tabla A.4. Valores precalculados para la simulación (ratio de utilización 66%)

Producto	Opción Productiva	Cálculo T	T (días)	n	m	ss	s	S
1	1		167,25	*	*	849	899	67.130
2	2		50,20	1	2	468	568	15.491
3	3		50,20	1	2	707	907	23.857
4	4		18,90	*	*	1.052	1.252	26.651
5	5		128,93	1	1	92	132	4.000
6	6		128,93	1	1	150	190	8.690
7	7	<i>DCC-ELSP-2P</i>	203,92	*	*	56	80	4.945
8	8		19,36	*	*	225	395	5.858
9	9		61,48	*	*	401	656	18.005
10	10		39,04	*	*	409	459	15.827
2	23		50,20	1	2	468	568	20.649
3	23		50,20	1	2	707	907	41.070
5	56		128,93	1	1	92	132	6.578
6	56		128,93	1	1	150	190	10.504
1	1		223,55	*	*	982	1.032	89.559
2	2		55,89	1	2	493	593	15.517
3	3		55,89	1	2	987	1.187	26.736
4	4		27,94	*	*	1.279	1.479	39.036
5	5		111,78	2	1	85	125	3.479
6	6		111,78	2	1	140	180	8.680
7	7	<i>DCC-ELSP-2P</i> Embuclado	223,55	*	*	59	83	5.416
8	8		27,94	*	*	270	440	8.326
9	9		111,78	*	*	540	795	32.339
10	10		55,89	*	*	489	539	22.537
2	23		55,89	1	2	493	593	22.949
3	23		55,89	1	2	987	1.187	45.898
5	56		111,78	2	1	85	125	5.714
6	56		111,78	2	1	140	180	9.122

Tabla A.5 H1..9-88%. Estadísticos: % sobre mejor resultado relativo, % sobre mejor resultado relativo, costes totales

Heurística		% sobre mejor resultado relativo	% sobre mejor resultado absoluto	Costes Totales
1	Media	13,98%	368,20%	206017,84
	N	396	396	396
	Desv. típ.	8,652%	35,539%	15637,668
	Mínimo	0%	311%	180749
	Máximo	24%	411%	224677
	Rango	24%	100%	43928
	Mediana	18,83%	388,12%	214782,22
	Varianza	74,850	1263,001	2,445E8
	Curtosis	-1,355	-1,355	-1,355
	Error típ. de la curtosis	,245	,245	,245
	Asimetría	-,639	-,639	-,639
	Error típ. de la asimetría	,123	,123	,123
2	Media	15,63%	371,91%	207647,81
	N	396	396	396
	Desv. típ.	8,348%	34,069%	14990,863
	Mínimo	0%	308%	179584
	Máximo	30%	429%	232933
	Rango	30%	121%	53349
	Mediana	20,11%	390,20%	215696,00
	Varianza	69,681	1160,682	2,247E8
	Curtosis	-1,246	-1,246	-1,246
	Error típ. de la curtosis	,245	,245	,245
	Asimetría	-,607	-,607	-,607
	Error típ. de la asimetría	,123	,123	,123

Heurística		% sobre mejor resultado relativo	% sobre mejor resultado absoluto	Costes Totales
3	Media	9,60%	9,60%	48223,81
	N	396	396	396
	Desv. típ.	4,884%	4,884%	2148,879
	Mínimo	0%	0%	44002
	Máximo	33%	33%	58558
	Rango	33%	33%	14556
	Mediana	8,36%	8,36%	47682,35
	Varianza	23,850	23,850	4617679,415
	Curtosis	3,852	3,852	3,852
	Error típ. de la curtosis	,245	,245	,245
	Asimetría	1,747	1,747	1,747
	Error típ. de la asimetría	,123	,123	,123
	4	Media	14,58%	22,59%
N		396	396	396
Desv. típ.		11,357%	12,151%	5346,746
Mínimo		0%	7%	47081
Máximo		56%	67%	73274
Rango		56%	60%	26193
Mediana		12,36%	20,22%	52899,67
Varianza		128,972	147,652	2,859E7
Curtosis		1,273	1,273	1,273
Error típ. de la curtosis		,245	,245	,245
Asimetría		1,292	1,292	1,292
Error típ. de la asimetría		,123	,123	,123

Heurística		% sobre mejor resultado relativo	% sobre mejor resultado absoluto	Costes Totales
5	Media	28,61%	497,49%	262904,80
	N	396	396	396
	Desv. típ.	19,667%	91,373%	40205,775
	Mínimo	0%	365%	204428
	Máximo	131%	972%	471628
	Rango	131%	607%	267200
	Mediana	24,34%	477,68%	254187,78
	Varianza	386,808	8349,044	1,617E9
	Curtosis	11,986	11,986	11,986
	Error típ. de la curtosis	,245	,245	,245
	Asimetría	3,372	3,372	3,372
	Error típ. de la asimetría	,123	,123	,123
	6	Media	15,80%	391,98%
N		864	864	864
Desv. típ.		8,527%	36,228%	15940,985
Mínimo		0%	325%	186947
Máximo		33%	465%	248438
Rango		33%	140%	61491
Mediana		19,53%	407,82%	223451,30
Varianza		72,710	1312,472	2,541E8
Curtosis		-1,248	-1,248	-1,248
Error típ. de la curtosis		,166	,166	,166
Asimetría		-,593	-,593	-,593
Error típ. de la asimetría		,083	,083	,083

Heurística		% sobre mejor resultado relativo	% sobre mejor resultado absoluto	Costes Totales
7	Media	18,17%	397,43%	218879,63
	N	864	864	864
	Desv. típ.	9,685%	40,767%	17938,229
	Mínimo	0%	321%	185226
	Máximo	39%	484%	256895
	Rango	39%	163%	71669
	Mediana	23,28%	418,94%	228341,41
	Varianza	93,790	1661,954	3,218E8
	Curtosis	-1,038	-1,038	-1,038
	Error típ. de la curtosis	,166	,166	,166
	Asimetría	-,594	-,594	-,594
	Error típ. de la asimetría	,083	,083	,083
	8	Media	63,13%	70,39%
N		864	864	864
Desv. típ.		63,835%	66,678%	29339,414
Mínimo		0%	4%	45962
Máximo		212%	226%	143320
Rango		212%	221%	97358
Mediana		30,19%	35,99%	59837,26
Varianza		4074,859	4445,931	8,608E8
Curtosis		-,531	-,531	-,531
Error típ. de la curtosis		,166	,166	,166
Asimetría		1,103	1,103	1,103
Error típ. de la asimetría		,083	,083	,083

Heurística		% sobre mejor resultado relativo	% sobre mejor resultado absoluto	Costes Totales
9	Media	64,77%	66,59%	73304,25
	N	864	864	864
	Desv. típ.	63,474%	64,175%	28238,305
	Mínimo	0%	1%	44488
	Máximo	255%	259%	158096
	Rango	255%	258%	113608
	Mediana	36,98%	38,49%	60938,51
	Varianza	4028,943	4118,481	7,974E8
	Curtosis	,514	,514	,514
	Error típ. de la curtosis	,166	,166	,166
	Asimetría	1,247	1,247	1,247
	Error típ. de la asimetría	,083	,083	,083
Total	Media	31,73%	239,74%	149493,33
	N	5436	5436	5436
	Desv. típ.	43,156%	184,934%	81374,311
	Mínimo	0%	0%	44002
	Máximo	255%	972%	471628
	Rango	255%	972%	427626
	Mediana	21,05%	325,48%	187220,35
	Varianza	1862,477	34200,660	6,622E9
	Curtosis	7,544	-1,321	-1,321
	Error típ. de la curtosis	,066	,066	,066
	Asimetría	2,829	-,024	-,024
	Error típ. de la asimetría	,033	,033	,033

Tabla A.6 H1..9-44%. Estadísticos: % sobre mejor resultado relativo, % sobre mejor resultado relativo, costes totales

Heurística		%sobre mejor relativo	%sobre mejor absoluto	Costes Totales
1	Media	161,51%	368,04%	1,176601037937E5
	N	396	396	396
	Desv. típ.	125,689%	224,953%	5,6550947267979E4
	Rango	516%	923%	2,3215567318E5
	Mínimo	0%	79%	4,4992704774E4
	Máximo	516%	1002%	2,7714837795E5
	Mediana	140,17%	329,85%	1,080611016189E5
	Varianza	15797,762	50603,933	3,198E9
	Curtosis	1,255	1,255	1,255
	Error típ. de la curtosis	,245	,245	,245
	Asimetría	1,292	1,292	1,292
	Error típ. de la asimetría	,123	,123	,123
	2	Media	137,20%	333,29%
N		396	396	396
Desv. típ.		88,482%	161,625%	4,0630988798164E4
Rango		375%	686%	1,7239802401E5
Mínimo		0%	83%	4,5920041312E4
Máximo		375%	768%	2,1831806533E5
Mediana		137,28%	333,42%	1,089586424494E5
Varianza		7829,071	26122,774	1,651E9
Curtosis		-,148	-,148	-,148
Error típ. de la curtosis		,245	,245	,245
Asimetría		,373	,373	,373
Error típ. de la asimetría		,123	,123	,123

Heurística		%sobre mejor relativo	%sobre mejor absoluto	Costes Totales
3	Media	120,67%	278,99%	9,527300955392E4
	N	396	396	396
	Desv. típ.	119,298%	204,890%	5,1507226212868E4
	Rango	518%	890%	2,2371120556E5
	Mínimo	0%	72%	4,3175210753E4
	Máximo	518%	962%	2,6688641632E5
	Mediana	96,48%	237,45%	8,483120921812E4
	Varianza	14232,048	41979,845	2,653E9
	Curtosis	4,332	4,332	4,332
	Error típ. de la curtosis	,245	,245	,245
	Asimetría	2,052	2,052	2,052
	Error típ. de la asimetría	,123	,123	,123
	4	Media	94,42%	257,72%
N		396	396	396
Desv. típ.		69,753%	128,339%	3,2263142461069E4
Rango		238%	437%	1,0997941518E5
Mínimo		0%	84%	4,6253393739E4
Máximo		238%	521%	1,5623280892E5
Mediana		84,31%	239,12%	8,525078972083E4
Varianza		4865,485	16470,919	1,041E9
Curtosis		-,876	-,876	-,876
Error típ. de la curtosis		,245	,245	,245
Asimetría		,508	,508	,508
Error típ. de la asimetría		,123	,123	,123

Heurística	%sobre mejor relativo	%sobre mejor absoluto	Costes Totales
5			
Media	6,90%	1093,40%	3,000074041569E5
N	396	396	396
Desv. típ.	22,130%	247,058%	6,2107790685561E4
Rango	93%	1043%	2,6207500000E5
Mínimo	0%	1016%	2,8065254305E5
Máximo	93%	2059%	5,4272754305E5
Mediana	,00%	1016,40%	2,806525430458E5
Varianza	489,727	61037,490	3,857E9
Curtosis	7,385	7,385	7,385
Error típ. de la curtosis	,245	,245	,245
Asimetría	3,000	3,000	3,000
Error típ. de la asimetría	,123	,123	,123
6			
Media	253,20%	253,20%	8,879108351302E4
N	864	864	864
Desv. típ.	209,768%	209,768%	5,2733630222310E4
Rango	548%	548%	1,3787134236E5
Mínimo	0%	0%	2,5138985450E4
Máximo	548%	548%	1,6301032781E5
Mediana	428,61%	428,61%	1,328866789553E5
Varianza	44002,753	44002,753	2,781E9
Curtosis	-1,914	-1,914	-1,914
Error típ. de la curtosis	,166	,166	,166
Asimetría	-,152	-,152	-,152
Error típ. de la asimetría	,083	,083	,083

Heurística	%sobre mejor relativo	%sobre mejor absoluto	Costes Totales
7			
Media	253,06%	253,55%	8,887870440352E4
N	864	864	864
Desv. típ.	211,784%	212,079%	5,3314617809252E4
Rango	573%	574%	1,4422304952E5
Mínimo	0%	0%	2,5174014034E4
Máximo	573%	574%	1,6939706355E5
Mediana	432,46%	433,21%	1,340423969856E5
Varianza	44852,604	44977,686	2,842E9
Curtosis	-1,912	-1,912	-1,912
Error típ. de la curtosis	,166	,166	,166
Asimetría	-,145	-,145	-,145
Error típ. de la asimetría	,083	,083	,083
8			
Media	222,11%	237,93%	8,495305180233E4
N	864	864	864
Desv. típ.	201,537%	211,436%	5,3152875144103E4
Rango	476%	500%	1,2561013049E5
Mínimo	0%	5%	2,6373748853E4
Máximo	476%	505%	1,5198387934E5
Mediana	239,50%	256,18%	8,954014629469E4
Varianza	40617,182	44705,199	2,825E9
Curtosis	-1,980	-1,980	-1,980
Error típ. de la curtosis	,166	,166	,166
Asimetría	,008	,008	,008
Error típ. de la asimetría	,083	,083	,083

Heurística		%sobre mejor relativo	%sobre mejor absoluto	Costes Totales
9	Media	220,70%	237,91%	8,494683718086E4
	N	864	864	864
	Desv. típ.	200,649%	211,415%	5,3147681008764E4
	Rango	474%	499%	1,2549605147E5
	Mínimo	0%	5%	2,6487827874E4
	Máximo	474%	505%	1,5198387934E5
	Mediana	232,24%	250,07%	8,800287572292E4
	Varianza	40260,202	44696,462	2,825E9
	Curtosis	-1,982	-1,982	-1,982
	Error típ. de la curtosis	,166	,166	,166
	Asimetría	,009	,009	,009
	Error típ. de la asimetría	,083	,083	,083
	Total	Media	188,78%	326,01%
N		5436	5436	5436
Desv. típ.		188,128%	300,448%	7,5529673797181E4
Rango		573%	2059%	5,1758855760E5
Mínimo		0%	0%	2,5138985450E4
Máximo		573%	2059%	5,4272754305E5
Mediana		91,75%	366,63%	1,173053443029E5
Varianza		35392,035	90269,227	5,705E9
Curtosis		-1,564	4,158	4,158
Error típ. de la curtosis		,066	,066	,066
Asimetría		,463	1,518	1,518
Error típ. de la asimetría		,033	,033	,033

Tabla A.7 H1..9-66%. Estadísticos: % sobre mejor resultado relativo, % sobre mejor resultado relativo, costes totales

Heurística		% sobre mejor resultado relativo	% sobre mejor resultado absoluto	Costes Totales
1	Media	164,69%	408,53%	1,16156E5
	N	396	396	396
	Desv. típ.	129,769%	249,316%	5,694773E4
	Rango	532%	1023%	233608,008
	Mínimo	0%	92%	43883,947
	Máximo	532%	1115%	277491,956
	Mediana	148,13%	376,72%	1,08891E5
	Varianza	16839,978	62158,328	3,243E9
	Curtosis	1,244	1,244	1,244
	Error típ. de la curtosis	,245	,245	,245
	Asimetría	1,280	1,280	1,280
	Error típ. de la asimetría	,123	,123	,123
2	Media	76,03%	367,29%	1,06737E5
	N	396	396	396
	Desv. típ.	51,644%	137,092%	3,131405E4
	Rango	216%	574%	130997,854
	Mínimo	0%	165%	60633,994
	Máximo	216%	739%	191631,848
	Mediana	61,41%	328,48%	97871,01327
	Varianza	2667,141	18794,241	9,806E8
	Curtosis	-,064	-,064	-,064
	Error típ. de la curtosis	,245	,245	,245
	Asimetría	,555	,555	,555
	Error típ. de la asimetría	,123	,123	,123

Heurística		% sobre mejor resultado relativo	% sobre mejor resultado absoluto	Costes Totales
3	Media	122,92%	310,34%	93727,31074
	N	396	396	396
	Desv. típ.	122,549%	225,579%	5,152590E4
	Rango	532%	980%	223741,637
	Mínimo	0%	84%	42045,046
	Máximo	532%	1064%	265786,682
	Mediana	81,30%	233,73%	76229,60299
	Varianza	15018,324	50885,912	2,655E9
	Curtosis	4,454	4,454	4,454
	Error típ. de la curtosis	,245	,245	,245
	Asimetría	2,087	2,087	2,087
	Error típ. de la asimetría	,123	,123	,123
4	Media	80,13%	305,33%	92583,20967
	N	396	396	396
	Desv. típ.	58,109%	130,754%	2,986643E4
	Rango	184%	414%	94541,371
	Mínimo	0%	125%	51397,341
	Máximo	184%	539%	145938,712
	Mediana	68,84%	279,93%	86781,16904
	Varianza	3376,644	17096,728	8,920E8
	Curtosis	-,924	-,924	-,924
	Error típ. de la curtosis	,245	,245	,245
	Asimetría	,596	,596	,596
	Error típ. de la asimetría	,123	,123	,123

Heurística		% sobre mejor resultado relativo	% sobre mejor resultado absoluto	Costes Totales
5	Media	126,63%	351,72%	1,03181E5
	N	396	396	396
	Desv. típ.	123,405%	245,977%	5,618502E4
	Rango	502%	1001%	228649,906
	Mínimo	0%	99%	45529,035
	Máximo	502%	1100%	274178,940
	Mediana	91,76%	282,22%	87306,34401
	Varianza	15228,746	60504,471	3,157E9
	Curtosis	3,188	3,188	3,188
	Error típ. de la curtosis	,245	,245	,245
	Asimetría	1,912	1,912	1,912
	Error típ. de la asimetría	,123	,123	,123
	6	Media	272,40%	283,59%
N		864	864	864
Desv. típ.		246,847%	254,267%	5,807870E4
Rango		535%	552%	125980,622
Mínimo		0%	3%	23528,174
Máximo		535%	555%	149508,796
Mediana		300,87%	312,92%	94317,55506
Varianza		60933,662	64651,732	3,373E9
Curtosis		-1,987	-1,987	-1,987
Error típ. de la curtosis		,166	,166	,166
Asimetría		-,012	-,012	-,012
Error típ. de la asimetría		,083	,083	,083

Heurística		% sobre mejor resultado relativo	% sobre mejor resultado absoluto	Costes Totales
7	Media	273,92%	283,20%	87528,62346
	N	864	864	864
	Desv. típ.	248,629%	254,797%	5,819968E4
	Rango	539%	552%	126100,513
	Mínimo	0%	2%	23408,284
	Máximo	539%	555%	149508,796
	Mediana	303,16%	313,17%	94373,99428
	Varianza	61816,161	64921,359	3,387E9
	Curtosis	-1,984	-1,984	-1,984
	Error típ. de la curtosis	,166	,166	,166
	Asimetría	-,014	-,014	-,014
	Error típ. de la asimetría	,083	,083	,083
	8	Media	273,30%	275,14%
N		864	864	864
Desv. típ.		260,247%	261,527%	5,973707E4
Rango		549%	551%	125941,419
Mínimo		0%	0%	22954,003
Máximo		549%	552%	148895,422
Mediana		277,45%	279,31%	86639,42572
Varianza		67728,416	68396,555	3,569E9
Curtosis		-2,001	-2,001	-2,001
Error típ. de la curtosis		,166	,166	,166
Asimetría		,000	,000	,000
Error típ. de la asimetría		,083	,083	,083

Heurística		% sobre mejor resultado relativo	% sobre mejor resultado absoluto	Costes Totales
9	Media	275,54%	275,54%	85780,30487
	N	864	864	864
	Desv. típ.	261,121%	261,121%	5,964421E4
	Rango	552%	552%	126053,808
	Mínimo	0%	0%	22841,614
	Máximo	552%	552%	148895,422
	Mediana	279,11%	279,11%	86595,04094
	Varianza	68184,083	68184,083	3,557E9
	Curtosis	-2,001	-2,001	-2,001
	Error típ. de la curtosis	,166	,166	,166
	Asimetría	,000	,000	,000
	Error típ. de la asimetría	,083	,083	,083
Total	Media	215,62%	304,60%	92417,21351
	N	5436	5436	5436
	Desv. típ.	226,352%	243,178%	5,554580E4
	Rango	552%	1115%	254650,342
	Mínimo	0%	0%	22841,614
	Máximo	552%	1115%	277491,956
	Mediana	86,42%	286,58%	88301,29953
	Varianza	51235,156	59135,593	3,085E9
	Curtosis	-1,543	-,491	-,491
	Error típ. de la curtosis	,066	,066	,066
	Asimetría	,563	,319	,319
	Error típ. de la asimetría	,033	,033	,033

Tabla A.8 H1..9-88%. Mejores Resultados de cada heurística extendidos

Orden	Heurística	Tiempo Simulación	RO	parametro corrector m	minimo Run Lenght / Cota Min Holgura	periodo Libre	Regla Secuencia RO	Regla Valor RO	Regla Stock Coproduc	Costes de Setup	Costes de Almacenamiento	Pérdidas de Ventas	Coste Total	Combinación	%sobre mejor relativo	%sobre mejor absoluto
2531	1	30,735	2	0	0	0	0	0,25	0	89.290	4.246,87	87.212,29	180.749,16	1	0,00%	310,78%
2532	1	30,531	2	0	0	1	0	0,25	0	89.290	4.246,87	87.212,29	180.749,16	2	0,00%	310,78%
2533	1	30,485	2	1	2	0	0	0,25	0	89.290	4.246,87	87.212,29	180.749,16	3	0,00%	310,78%
2534	1	30,844	2	1	4	0	0	0,25	0	89.290	4.246,87	87.212,29	180.749,16	5	0,00%	310,78%
2535	1	30,375	2	1	6	0	0	0,25	0	89.290	4.246,87	87.212,29	180.749,16	7	0,00%	310,78%
2536	1	30,438	2	1	2	1	0	0,25	0	89.290	4.246,87	87.212,29	180.749,16	4	0,00%	310,78%
2537	1	30,563	2	1	4	1	0	0,25	0	89.290	4.246,87	87.212,29	180.749,16	6	0,00%	310,78%
2538	1	30,282	2	1	6	1	0	0,25	0	89.290	4.246,87	87.212,29	180.749,16	8	0,00%	310,78%
2539	1	30,625	2	2	0	0	0	0,25	0	89.290	4.246,87	87.212,29	180.749,16	11	0,00%	310,78%
2521	2	30,844	2	0	0	0	4	0	0	85.970	4.249,40	89.364,71	179.584,11	1	0,00%	308,13%
2522	2	29,953	2	0	0	1	4	0	0	85.970	4.249,40	89.364,71	179.584,11	2	0,00%	308,13%
2523	2	29,939	2	1	2	0	4	0	0	85.970	4.249,40	89.364,71	179.584,11	3	0,00%	308,13%
2524	2	30,188	2	1	4	0	4	0	0	85.970	4.249,40	89.364,71	179.584,11	5	0,00%	308,13%
2525	2	30,579	2	1	6	0	4	0	0	85.970	4.249,40	89.364,71	179.584,11	7	0,00%	308,13%
2526	2	30,095	2	1	2	1	4	0	0	85.970	4.249,40	89.364,71	179.584,11	4	0,00%	308,13%
2527	2	30,235	2	1	4	1	4	0	0	85.970	4.249,40	89.364,71	179.584,11	6	0,00%	308,13%
2528	2	30,047	2	1	6	1	4	0	0	85.970	4.249,40	89.364,71	179.584,11	8	0,00%	308,13%
2529	2	29,922	2	2	0	0	4	0	0	85.970	4.249,40	89.364,71	179.584,11	11	0,00%	308,13%
1	3	27,078	2	1	6	1	3	0	0	20.165	19.258,94	4.577,83	44.001,76	8	0	0
170	4	26,156	2	1	4	0	4	0	0	23.580	20.871,09	2.629,54	47.080,64	5	0,00%	7,00%
3326	5	20,516	3	0	0	0	0	0	3	85.565	3.135,81	115.727,25	204.428,06	1	0,00%	364,59%
2695	6	97,483	2	5	1	0	0	0,25	0	90.885	3.583,27	92.478,47	186.946,75	12	0,00%	324,86%
2696	6	97,66	2	5	2	0	0	0,25	0	90.885	3.583,27	92.478,47	186.946,75	14	0,00%	324,86%
2697	6	97,513	2	5	4	0	0	0,25	0	90.885	3.583,27	92.478,47	186.946,75	16	0,00%	324,86%
2698	6	98,675	2	5	1	1	0	0,25	0	90.885	3.583,27	92.478,47	186.946,75	13	0,00%	324,86%
2699	6	97,426	2	5	2	1	0	0,25	0	90.885	3.583,27	92.478,47	186.946,75	15	0,00%	324,86%

Tabla A.8 H1..9-88%. Mejores Resultados de cada heurística extendidos

Orden	Heurística	Tiempo Simulación	RO	parametro corrector m	minimo Run / Cota Min Lenght / Holgura	periodo Libre	Regla Secuencia RO	Regla Valor RO	Regla Stock Coproduc	Costes de Setup	Costes de Almacenamiento	Pérdidas de Ventas	Coste Total	Combinación	%sobre mejor relativo	%sobre mejor absoluto
2700	6	98,879	2	5	4	1	0	0,25	0	90.885	3.583,27	92.478,47	186.946,75	17	0,00%	324,86%
2633	7	105,11	2	7	1	0	2	0	0	88.790	3.914,55	92.521,00	185.225,55	12	0,00%	320,95%
2634	7	107,27	2	7	2	0	2	0	0	88.790	3.914,55	92.521,00	185.225,55	14	0,00%	320,95%
2635	7	105,66	2	7	4	0	2	0	0	88.790	3.914,55	92.521,00	185.225,55	16	0,00%	320,95%
2636	7	105,41	2	7	1	1	2	0	0	88.790	3.914,55	92.521,00	185.225,55	13	0,00%	320,95%
2637	7	107,11	2	7	2	1	2	0	0	88.790	3.914,55	92.521,00	185.225,55	15	0,00%	320,95%
2638	7	107,38	2	7	4	1	2	0	0	88.790	3.914,55	92.521,00	185.225,55	17	0,00%	320,95%
34	8	46,923	2	5	1	1	0	0,25	0	23.635	20.077,58	2.249,02	45.961,60	13	0,00%	4,45%
35	8	46,798	2	5	1	1	0	0,5	0	23.635	20.077,58	2.249,02	45.961,60	13	0,00%	4,45%
36	8	46,844	2	5	1	1	0	0,75	0	23.635	20.077,58	2.249,02	45.961,60	13	0,00%	4,45%
37	8	46,486	2	5	1	1	0	1	0	23.635	20.077,58	2.249,02	45.961,60	13	0,00%	4,45%
38	8	47,048	2	5	1	1	0	0	1	23.635	20.077,58	2.249,02	45.961,60	13	0,00%	4,45%
2	9	30,531	1	3	1	1	2	0	0	20.090	18.455,55	5.942,46	44.488,02	13	0,00%	1,11%

Tabla A.9 H1..9-88%. Mejores Resultados Absolutos en orden creciente

Orden	Heur.	Tiempo Simulación	RO	parametro / corrector m	minimo Run Lenght / Cota Min Holgura	periodo Libre	Regla Secuencia RO	Regla Valor RO	Regla Inventario Coproducto	Costes de Setup	Costes de Almacenamiento	Pérdidas de Ventas	Coste Total	Combinación	%sobre mejor relativo	%sobre mejor absoluto
1	3	27,078	2	1	6	1	3	0	0	20165	19.258,935	4.577,828	44.001,763	8	0,00%	0,00%
2	9	30,531	1	3	1	1	2	0	0	20090	18.455,555	5.942,464	44.488,018	13	0,00%	1,11%
3	3	26,406	2	1	6	1	4	0	0	20755	19.488,133	4.305,233	44.548,367	8	1,24%	1,24%
4	3	27,11	2	1	6	1	2	0	0	20720	19.240,685	4.807,151	44.767,836	8	1,74%	1,74%
5	3	8,687	3	1	6	1	3	0	0	20045	18.921,034	5.937,345	44.903,379	8	2,05%	2,05%
6	9	31,704	1	3	1	1	0	0	2	20440	18.383,827	6.086,637	44.910,465	13	0,95%	2,07%
7	9	31,047	1	3	2	1	0	0	2	19995	19.790,261	5.220,595	45.005,855	15	1,16%	2,28%
8	9	32,172	1	3	1	1	0	0	3	21140	17.649,551	6.232,733	45.022,284	13	1,20%	2,32%
9	9	30,891	1	3	2	1	3	0	0	19460	18.820,836	6.898,781	45.179,617	15	1,55%	2,68%
10	9	31,547	1	3	1	1	1	0	0	20835	18.649,445	5.816,641	45.301,086	13	1,83%	2,95%
34	8	46,923	2	5	1	1	0	1	0	23635	20.077,583	2.249,019	45.961,602	13	0,00%	4,45%
35	8	46,798	2	5	1	1	0	2	0	23635	20.077,583	2.249,019	45.961,602	13	0,00%	4,45%
36	8	46,844	2	5	1	1	0	3	0	23635	20.077,583	2.249,019	45.961,602	13	0,00%	4,45%
37	8	46,486	2	5	1	1	0	4	0	23635	20.077,583	2.249,019	45.961,602	13	0,00%	4,45%
38	8	47,048	2	5	1	1	0	0	1	23635	20.077,583	2.249,019	45.961,602	13	0,00%	4,45%
170	4	26,156	2	1	4	0	4	0	0	23580	20.871,093	2.629,545	47.080,637	5	0,00%	7,00%
189	4	26,604	2	0	0	0	4	0	0	23690	20.618,560	2.937,280	47.245,839	1	0,35%	7,37%

Tabla A.10. Desglose de costes para mejores resultados de cada heurística (44%)

Heurística	Costes de Setup	Costes de Inventario	Pérdidas de Ventas	Costes Totales
1	24.735	20.199,885	57,820	44.992,705
2	20.250	25.670,041	0,000	45.920,041
3	20.575	18.453,319	4.146,892	43.175,211
4	19.990	26.172,721	90,672	46.253,394
5	8.965	2.031,304	269.656,239	280.652,543
6	15.860	9.232,084	46,901	25.138,985
7	15.750	9.364,856	59,159	25.174,014
8	14.125	9.582,536	2.666,213	26.373,749
9	13.485	9.729,615	3.273,213	26.487,828

Tabla A.11. Desglose de costes para mejores resultados de cada heurística (66%)

Heurística	Costes de Setup	Costes de Inventario	Pérdidas de Ventas	Costes Totales
1	22.905	20.969,077	9,871	43.883,947
2	27.750	32.883,994	0,000	60.633,994
3	19.755	19.458,574	2.831,472	42.045,046
4	11.745	23.378,958	16.273,383	51.397,341
5	18.965	22.031,304	4.532,731	45.529,035
6	13.880	9.647,478	0,696	23.528,174
7	13.785	9.454,622	168,662	23.408,284
8	12.575	10.114,204	264,799	22.954,003
9	12.235	10.318,361	288,252	22.841,614

Tabla A.12. Resumen % sobre mejor resultado absoluto (44%)

%sobre mejor absoluto (44%)

Heurística	N	Media	Desv. típ.
1	396	368,04%	224,953%
2	396	333,29%	161,625%
3	396	278,99%	204,890%
4	396	257,72%	128,339%
5	396	1093,40%	247,058%
6	864	253,20%	209,768%
7	864	253,55%	212,079%
8	864	237,93%	211,436%
9	864	237,91%	211,415%
Total	5436	326,01%	300,448%

Tabla A.13. Resumen % sobre mejor resultado absoluto (66%)

% sobre mejor resultado absoluto (66%)

Heurística	N	Media	Desv. típ.
1	396	408,53%	249,316%
2	396	367,29%	137,092%
3	396	310,34%	225,579%
4	396	305,33%	130,754%
5	396	351,72%	245,977%
6	864	283,59%	254,267%
7	864	283,20%	254,797%
8	864	275,14%	261,527%
9	864	275,54%	261,121%
Total	5436	304,60%	243,178%

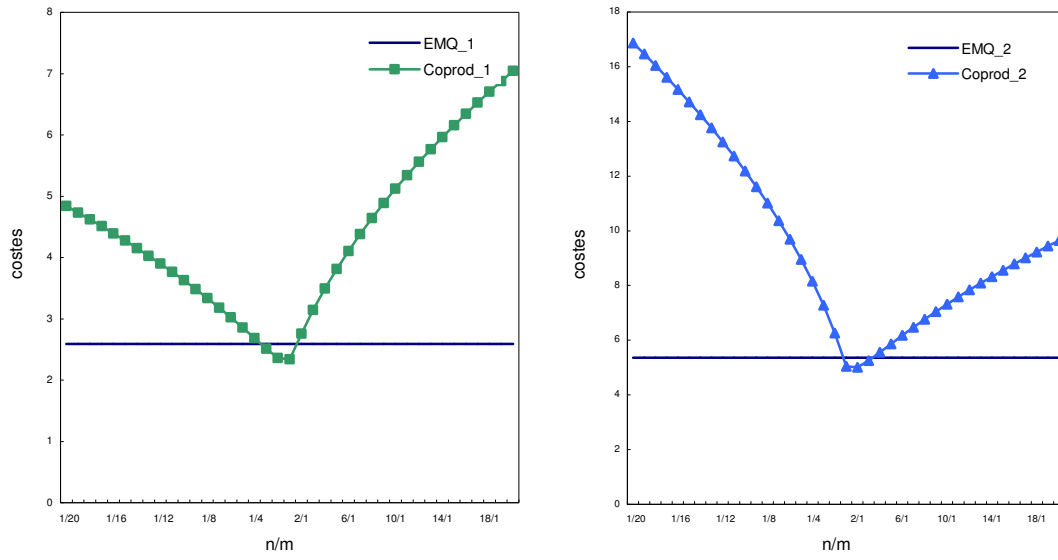


Figura A.1 Evolución de costes en un sistema al 44% en función de la combinación (n,m) para el caso: (a) 2 y 3 (b) 5 y 6

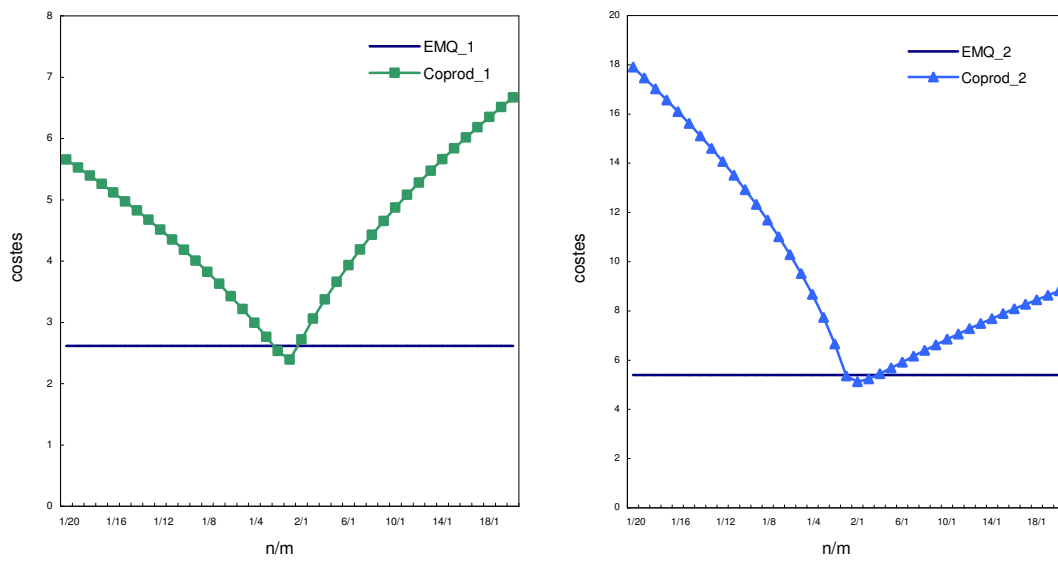


Figura A.2 Evolución de costes en un sistema al 66% en función de la combinación (n,m) para el caso: (a) 2 y 3 (b) 5 y 6

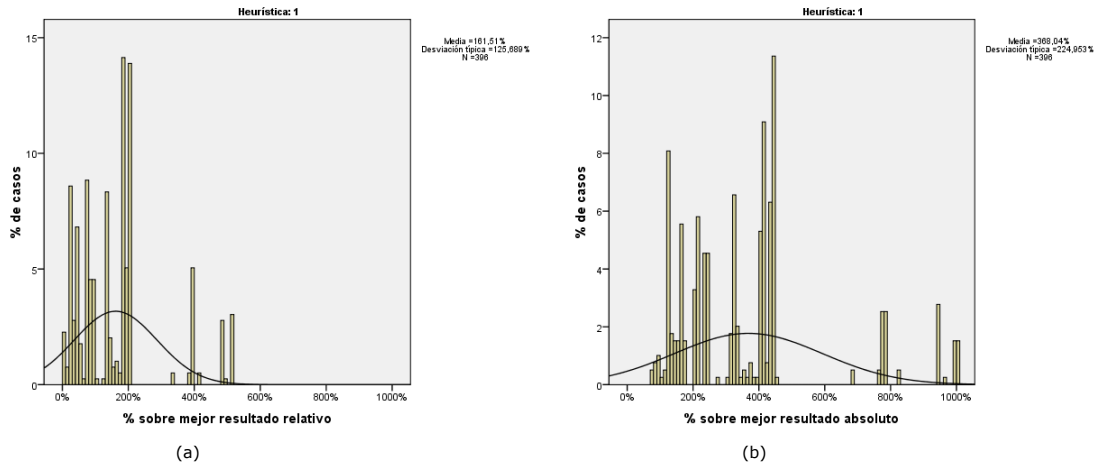


Figura A.3 H1-44%. Distribución de casos frente a: (a) %sobre su mejor resultado relativo
(b) % sobre su mejor resultado absoluto

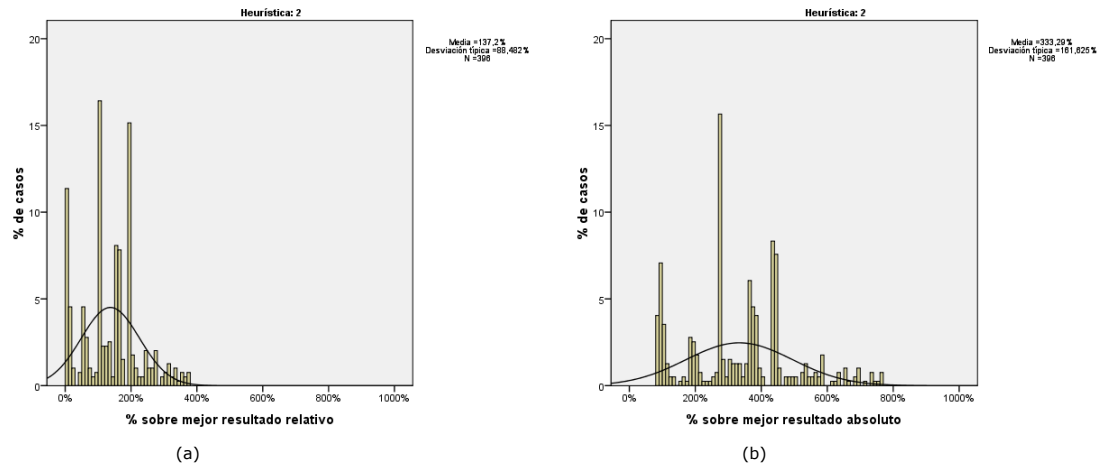


Figura A.4 H2-44%. Distribución de casos frente a: (a) %sobre su mejor resultado relativo
(b) % sobre su mejor resultado absoluto

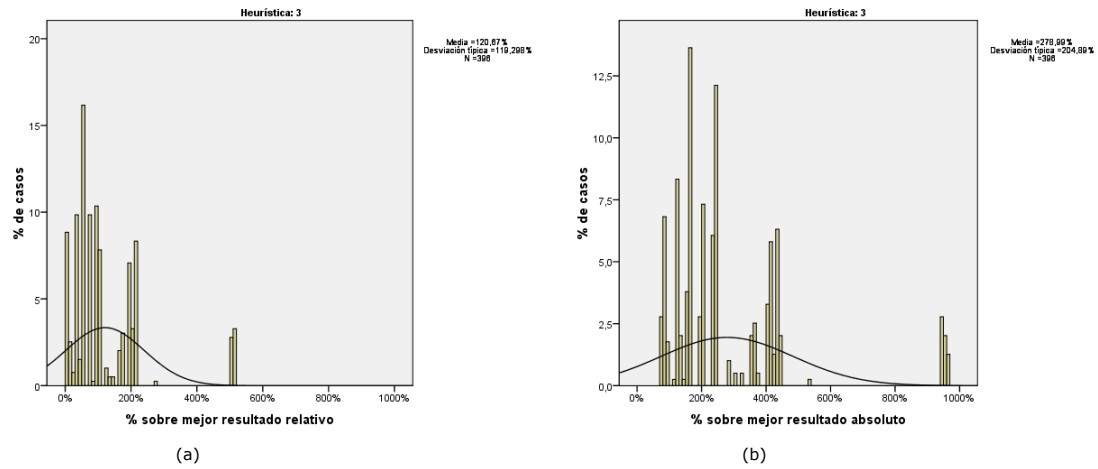


Figura A.5 H3-44%. Distribución de casos frente a: (a) %sobre su mejor resultado relativo
(b) % sobre su mejor resultado absoluto

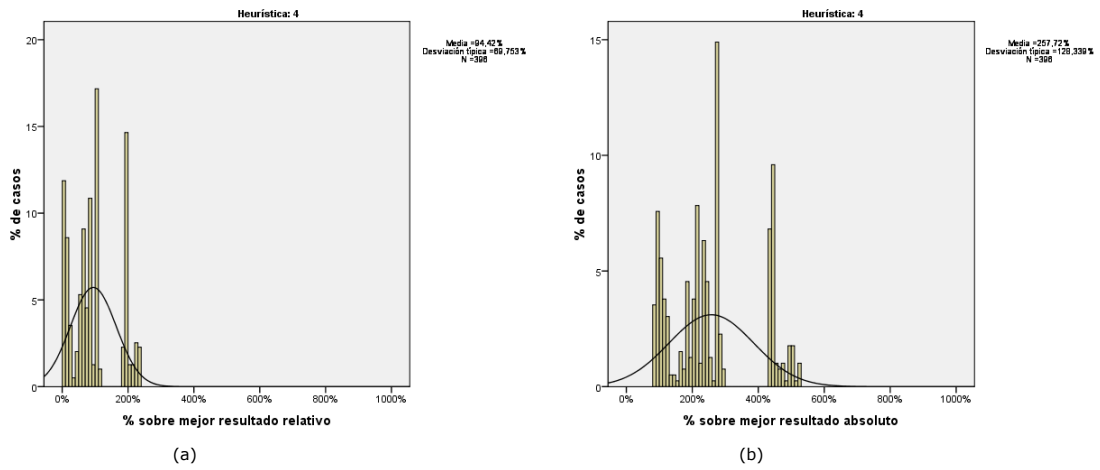


Figura A.6 H4-44%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

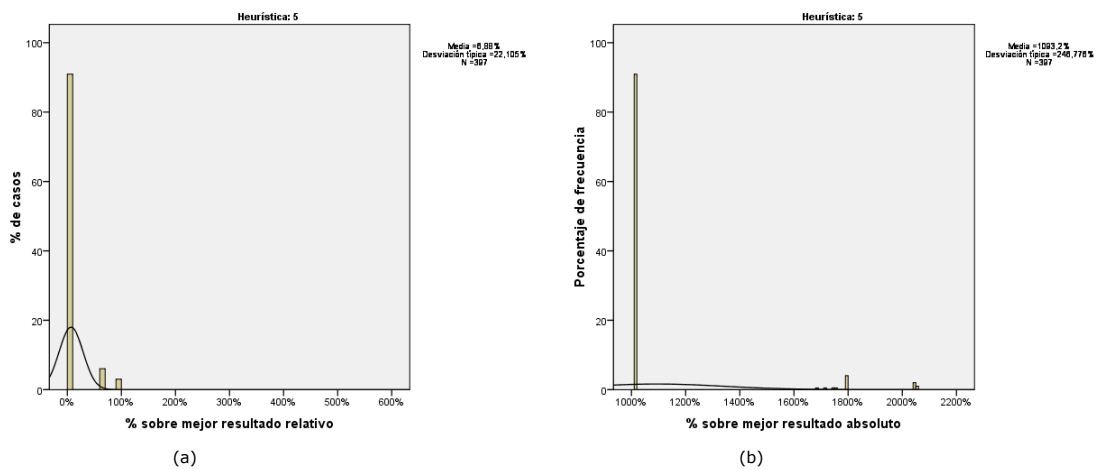


Figura A.7 H5-44%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

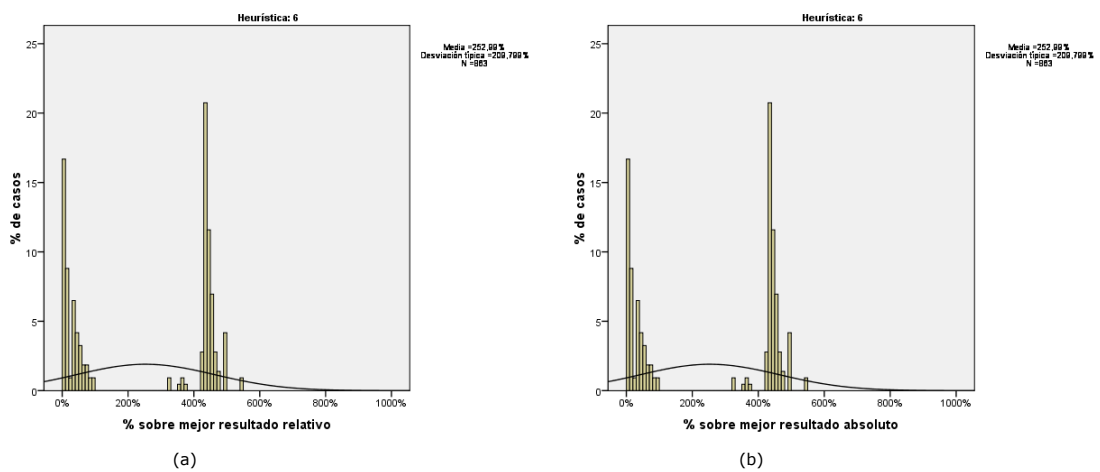


Figura A.8 H6-44%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

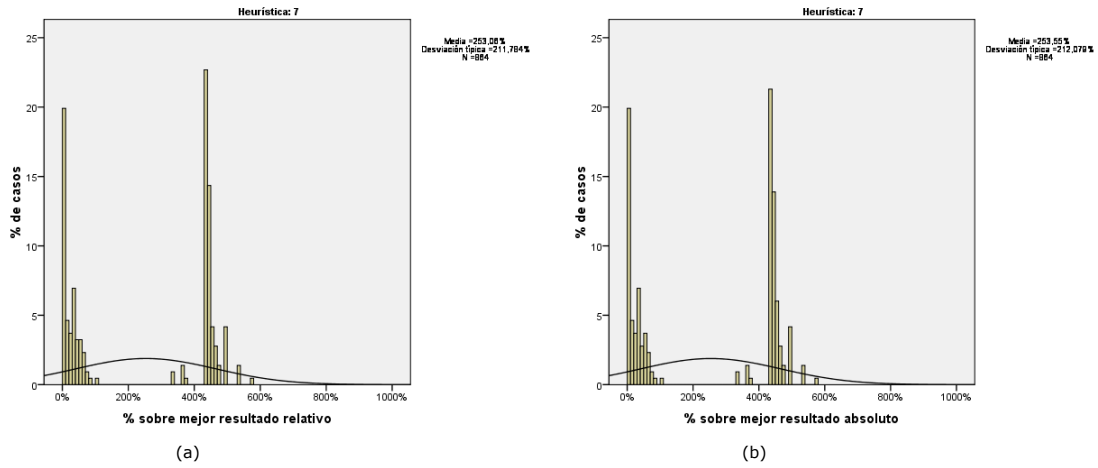


Figura A.9 H7-44%. Distribución de casos frente a: (a) %sobre su mejor resultado relativo
(b) % sobre su mejor resultado absoluto

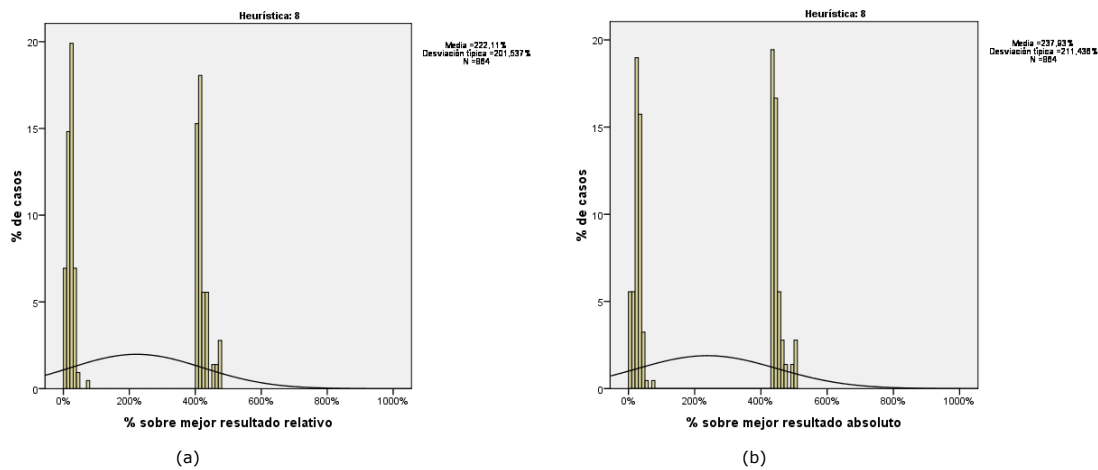


Figura A.10 H8-44%. Distribución de casos frente a: (a) %sobre su mejor resultado relativo
(b) % sobre su mejor resultado absoluto

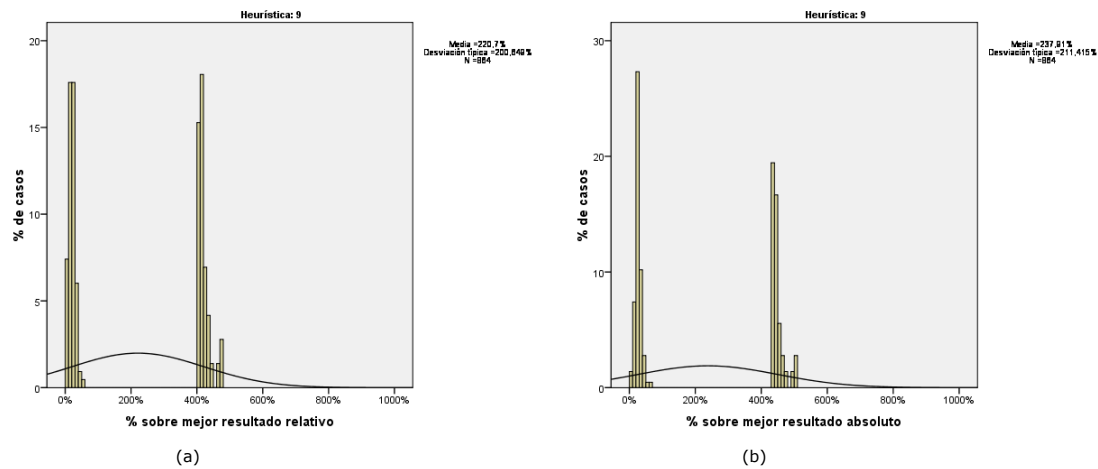


Figura A.11 H9-44%. Distribución de casos frente a: (a) %sobre su mejor resultado relativo
(b) % sobre su mejor resultado absoluto

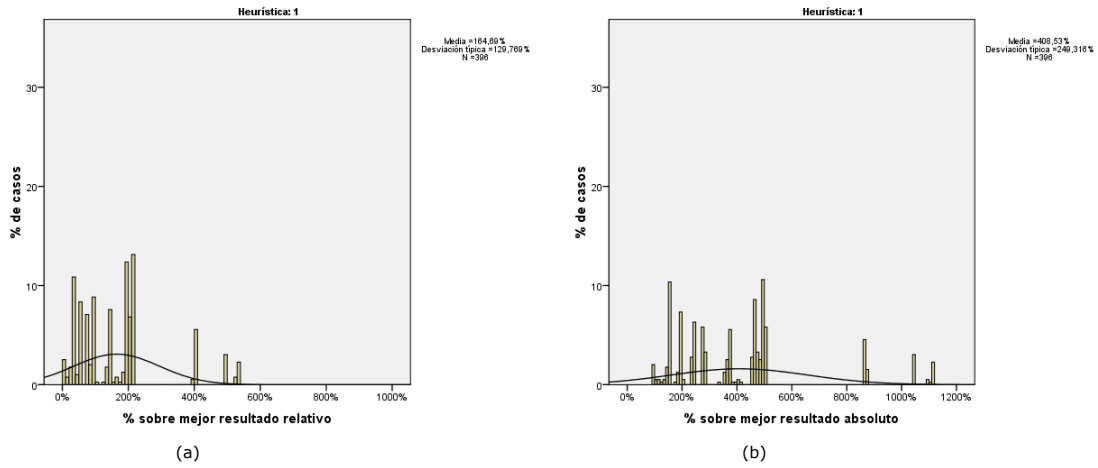


Figura A.12 H1-66%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo
(b) % sobre su mejor resultado absoluto

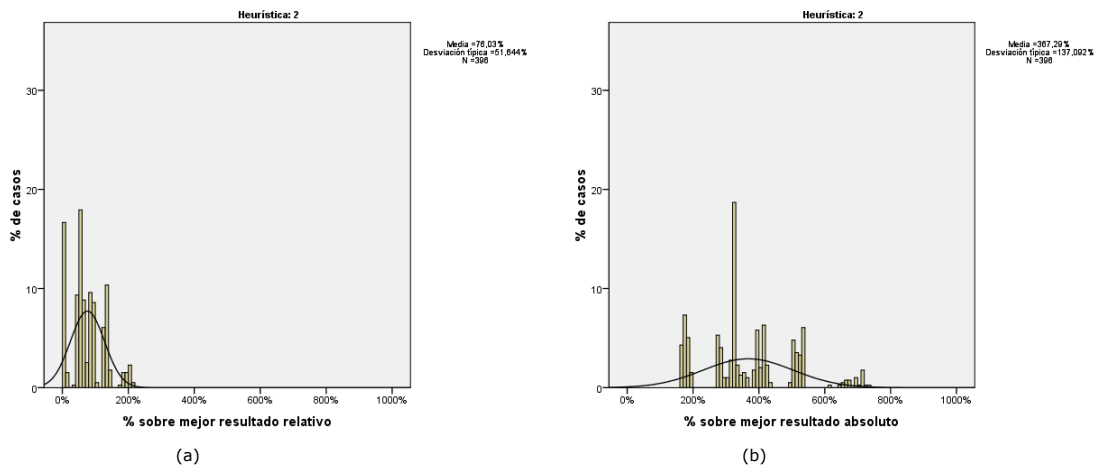


Figura A.13 H2-66%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo
(b) % sobre su mejor resultado absoluto

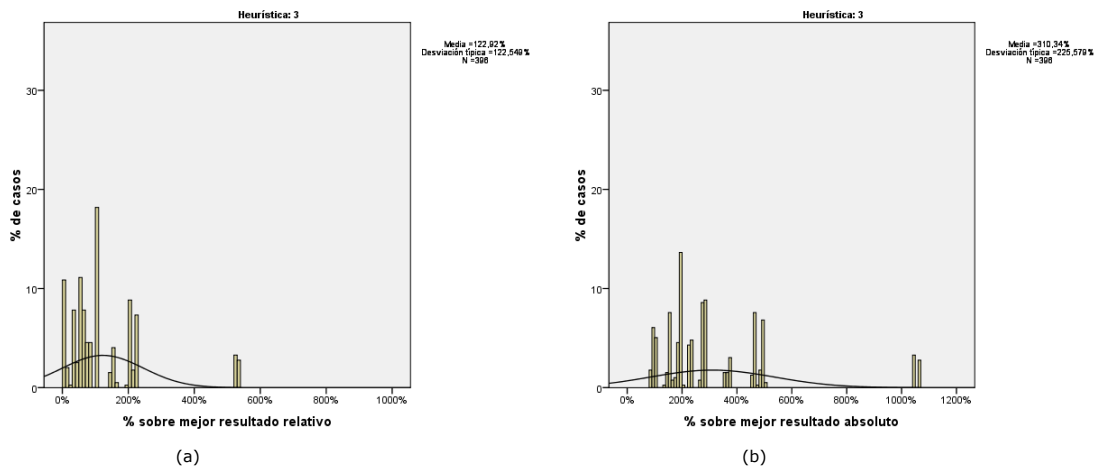


Figura A.14 H3-66%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo
(b) % sobre su mejor resultado absoluto

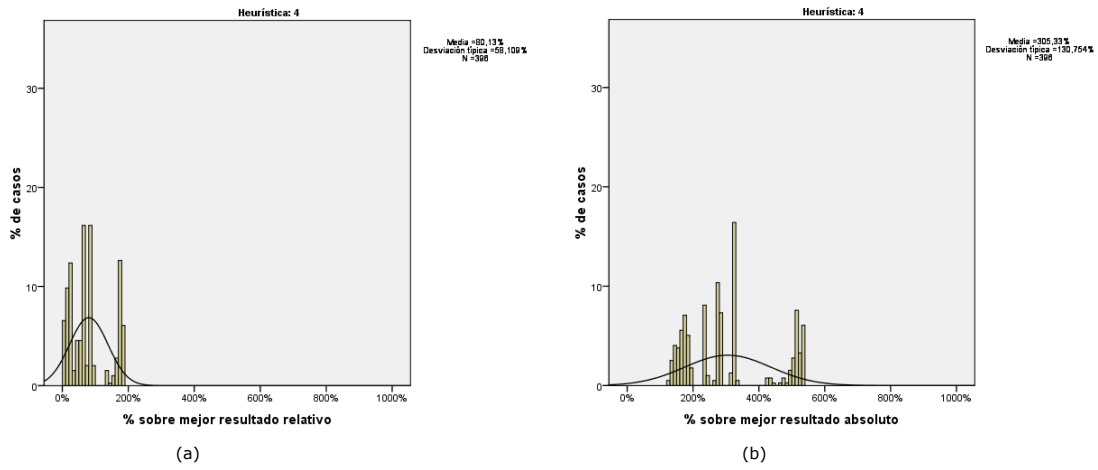


Figura A.15 H4-66%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

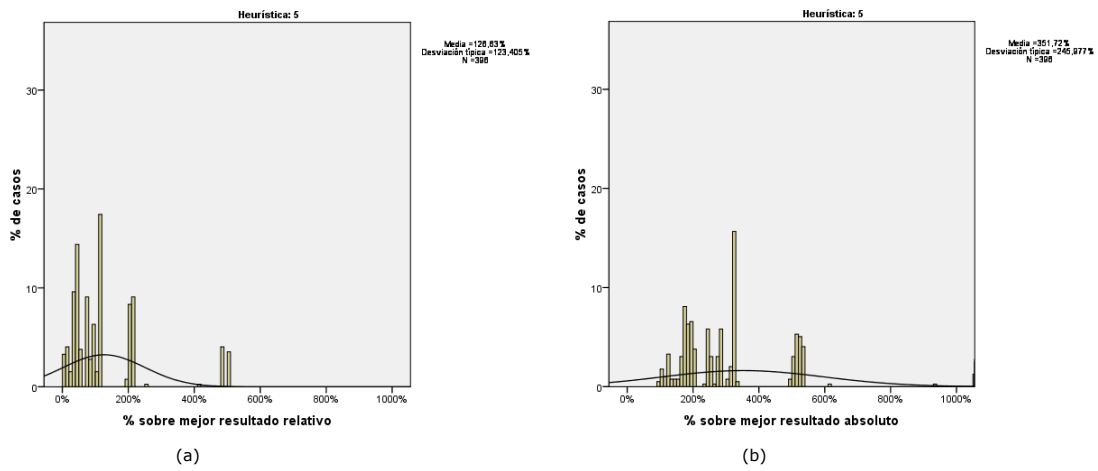


Figura A.16 H5-66%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

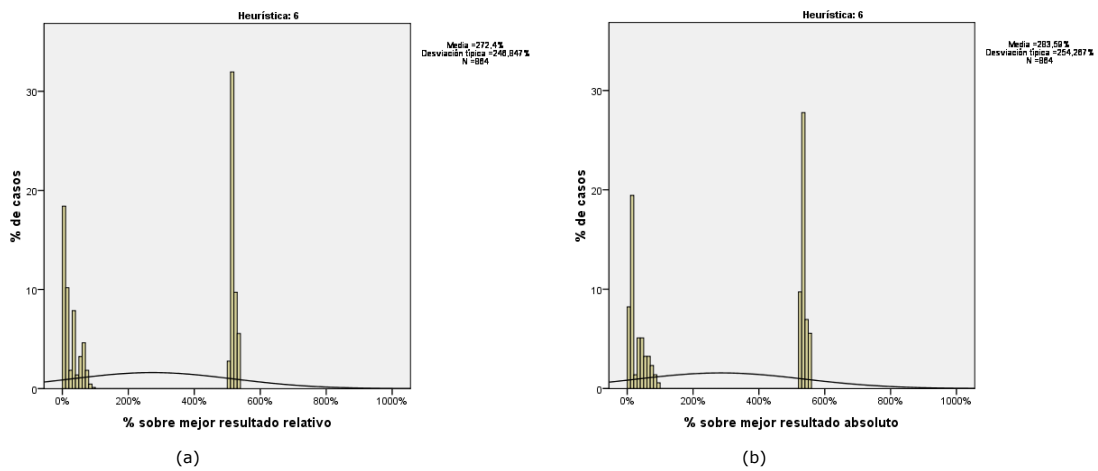


Figura A.17 H6-66%. Distribución de casos frente a: (a) % sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

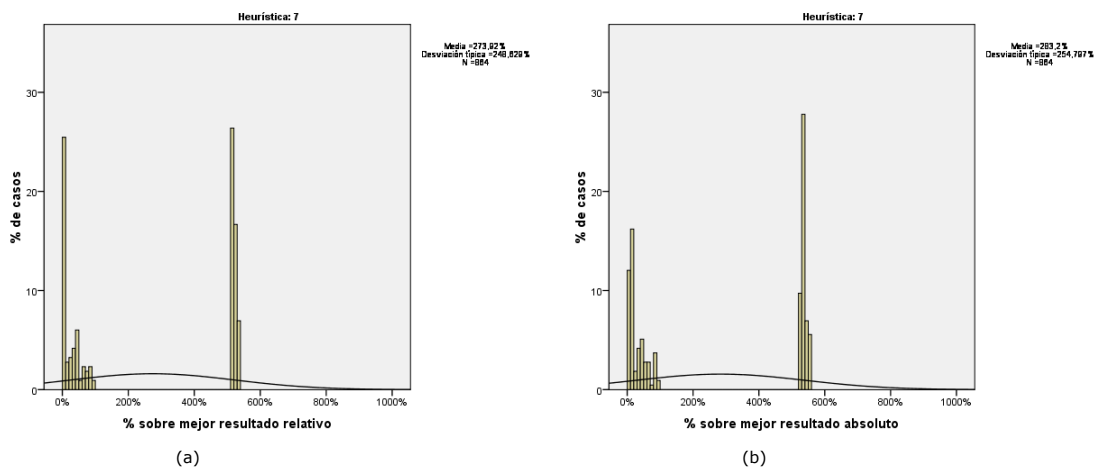


Figura A.18 H7-66%. Distribución de casos frente a: (a) %sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

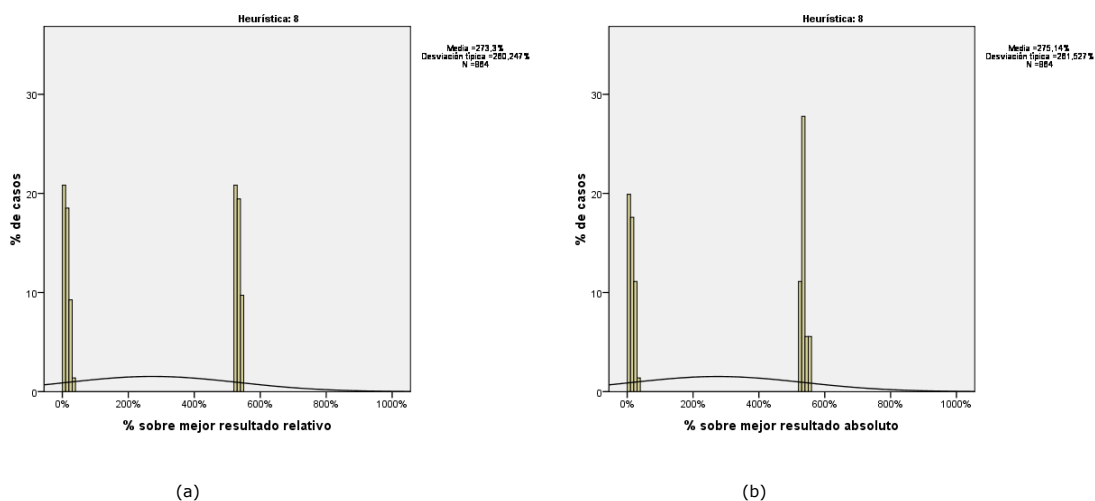


Figura A.19 H8-66%. Distribución de casos frente a: (a) %sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

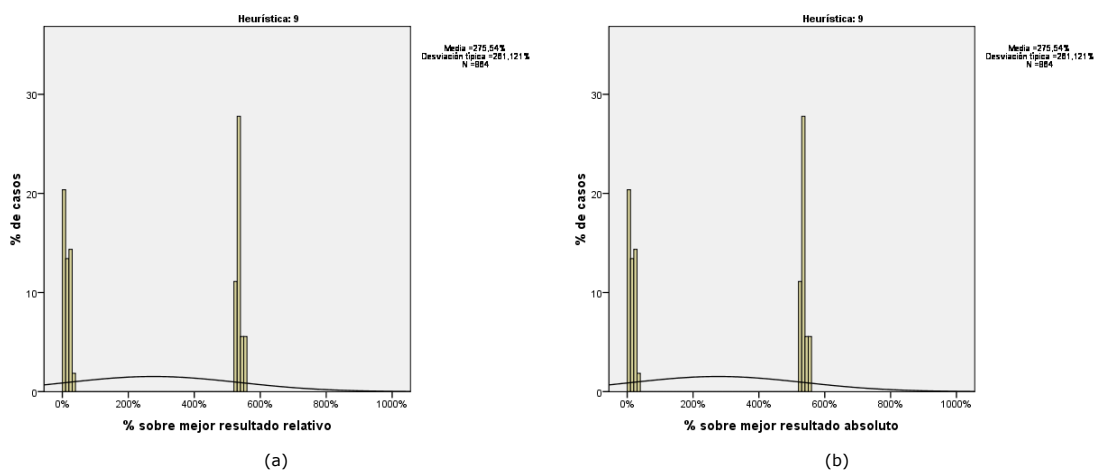


Figura A.20 H9-66%. Distribución de casos frente a: (a) %sobre su mejor resultado relativo (b) % sobre su mejor resultado absoluto

A.5 Glosario de heurísticas

Las heurísticas se enumeran de modo completo de acuerdo con la siguiente regla:

- Heurística 1 / (Harris, 1913) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* / (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 1

- Heurística 2 / (Doll&Whybark, 1973) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* embuclado / (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 2

- Heurística 3/ (Fransoo, 1993) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* / (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 3

- Heurística 4/ (Fransoo, 1993) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* embuclado/ (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 4

- Heurística 5/ (Vergin Lee, 1978) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* embuclado / (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 5

- Heurística 6/ (Leachman y Gascon, 1988) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* embuclado al inicio de la heurística y en el recálculo del periodo básico/ (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 6

- Heurística 7/ (Leachman y Gascon, 1988) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* embuclado sólo al inicio de la heurística/ (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 7

- Heurística 8/ (Leachman y Gascon, 1988) (Fransoo, 1993) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* embuclado al inicio de la heurística y en el recálculo del periodo básico, Tiempo de Ciclo Maximizado / (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 8

- Heurística 9/ (Leachman y Gascon, 1988) (Fransoo, 1993) / Coproducción Deliberada y Controlada, Tiempo de Ciclo algoritmo *DCC-ELSP-2P* empujado sólo al inicio de la heurística, Tiempo de Ciclo Maximizado / (Vidal-Carreras, 2011)

Nombre abreviado: Heurística 9