

Aplicación de la programación robusta a modelos de planificación de la producción bajo incertidumbre

TRABAJO FIN DE MASTER

Máster Universitario en Ingeniería de Organización y Logística

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

Universitat Politècnica de València

Alumno:	Antonio G. Martín Ramos
Director(es):	Francisco Manuel Díaz-Madroñero Boluda Josefa Mula Bru
Fecha de entrega:	Septiembre 2016

Contenido

1	Introducción.....	4
1.1	Referencias.....	5
2	Estado del arte	6
2.1	Introducción	6
2.2	Metodología empleada en la revisión bibliográfica.....	6
2.3	Criterios de clasificación.....	8
2.3.1	Tipo de problema.....	8
2.3.2	Enfoque de modelado.....	11
2.3.3	Fuentes de incertidumbre	19
2.3.4	Estructura de la función objetivo.....	21
2.3.5	Enfoque de solución.....	25
2.3.6	Herramientas de desarrollo	29
2.3.7	Aplicación.....	31
2.3.8	Ventajas	34
2.3.9	Limitaciones	36
2.4	Discusión	40
2.5	Conclusiones.....	41
2.6	Referencias.....	42
3	Descripción de la planificación de la producción de una empresa del sector del automóvil	47
3.1	Introducción	47
3.2	Descripción del proceso productivo.....	47
3.3	Descripción del proceso logístico.....	48
3.4	Planificación de la producción actual.....	49
3.5	Procedimiento heurístico	51
3.5.1	Planificación de la Producción	51
3.5.2	Cálculo de la materia prima a solicitar al proveedor	53
3.6	Conclusiones.....	55
4	Planteamiento analítico del problema para la planificación de la producción en una empresa del sector del automóvil	56
4.1	Descripción del problema	56
4.2	Restricciones	57

4.3	Datos del problema	57
4.4	Formulación del modelo determinista adaptado de Mula (2004).....	58
4.4.1	Elementos	58
4.4.2	Datos	58
4.4.3	Variables de decisión	58
4.4.4	Función objetivo	59
4.4.5	Restricciones	59
4.5	Formulación del modelo robusto con el enfoque de Soyster (1973)	60
4.6	Formulación del modelo robusto con el enfoque de Bertsimas y Sim (2004).....	60
4.7	Conclusiones.....	61
4.8	Referencias.....	62
5	Aplicación en la planificación de la producción de una empresa del sector del automóvil	63
5.1	Implementación y resolución.....	63
5.1.1	Modelo determinista adaptado de Mula (2004)	68
5.1.2	Modelo robusto con el enfoque de Soyster (1973).....	69
5.1.3	Modelo robusto con el enfoque de Bertsimas y Sim (2004)	70
5.1.4	Comparación de resultados	71
5.2	Conclusiones.....	73
5.3	Referencias.....	74
6	Conclusiones y líneas futuras de investigación.....	75
6.1	Conclusiones.....	75
6.2	Líneas futuras de investigación	76
6.3	Referencias.....	76
Anexo I - Implementación de los modelos propuestos en MPL		77
I.1	Modelo Determinista.....	77
I.2	Modelo robusto con enfoque de Soyster	79
I.3	Modelo robusto con enfoque de Bertsimas	81

1 Introducción

Los modelos de programación matemática constituyen una herramienta eficaz en el proceso de toma de decisiones y constituyen una de las áreas más importantes de la matemática aplicada. El presente trabajo final de máster se centra en una de las técnicas de programación matemática con mayor proyección en el campo de las operaciones, la programación robusta, con el objetivo de aplicarlo a un problema de planificación de la producción basado en un entorno real en el sector de la automoción.

El fin de la programación robusta es conseguir modelos capaces de hacer frente a la incertidumbre, lo que conlleva pagar un precio por dicha protección. No obstante, los avances logrados en las últimas investigaciones publicadas sobre programación robusta permiten incorporar un control sobre el coste asociado a dicha robustez. El objetivo de este proyecto es doble, por un lado, se lleva a cabo un estudio de la literatura sobre programación robusta aplicada, principalmente, en el área de la planificación de la producción para entender los orígenes, evolución y estado actual de la programación robusta e identificar su aplicación potencial. Por otro lado, se aplican diferentes enfoques de programación robusta a un problema de planificación de la producción en el sector del automóvil con vistas a validar su aplicabilidad real en un contexto de incertidumbre en un contexto de incertidumbre en el proceso, concretamente, en el tiempo de fabricación. Para ello, en primer lugar, se formula un modelo de programación matemática determinista adaptado de Mula (2004). Posteriormente, el modelo determinista es transformado en sendos modelos robustos adoptando los enfoques de Soyster (1973) y Bertsimas y Sim (2004), respectivamente. Finalmente, estos tres modelos son comparados con el procedimiento heurístico actual que es llevado por la empresa objeto de la aplicación.

La estructura del proyecto se ha organizado como sigue. En el capítulo 2 se realiza un estudio sobre el estado actual de la programación robusta, para lo que se establece una taxonomía para la realización de dicho estudio, que se basa en los siguientes criterios: tipo de problema, enfoque de modelado, fuentes de incertidumbre, estructura de la función objetivo, enfoque de la solución, herramientas de desarrollo, aplicación, ventajas y limitaciones. En el capítulo 3 se describe el problema de planificación de la producción con incertidumbre en el proceso de la empresa del sector de la automoción en el que se aplica el enfoque robusto, el cual es definido en el capítulo 4 a partir del modelo determinista de Mula (2004). Estos modelos son implementados en el software de optimización MPL, para resolverlos posteriormente a través del solver Gurobi. Una vez ejecutados dichos modelos, los resultados obtenidos son analizados en el capítulo 5. Por último, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones y las líneas futuras de investigación identificadas.

1.1 Referencias

Bertsimas, D. & Sim, M., 2004. The Price of robustness. *Operations Research*, 52(1), pp.35–53.

Mula, J., 2004. *Modelos para la Planificación de la Producción bajo Incertidumbre. Aplicación a una Empresa del Sector del Automóvil*. Departamento de Organización de Empresas, Universidad Politécnica de Valencia.

Soyster, A. L. 1973. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, 21 pp. 1154–1157.

2 Estado del arte

2.1 Introducción

En esta sección se realiza una investigación de la literatura relacionada con la programación robusta aplicada al problema de la planificación de la producción.

En primer lugar, se describe la metodología aplicada para la revisión bibliográfica realizada, para a continuación realizar una clasificación de los distintos trabajos científicos considerados en función de los siguientes criterios: tipo de problema, enfoque de modelado, fuentes de incertidumbre, estructura de la función objetivo, enfoque de la solución, herramientas de desarrollo, aplicación, ventajas y limitaciones.

2.2 Metodología empleada en la revisión bibliográfica

La búsqueda de artículos relacionados con la programación robusta fue realizada a través de la plataforma digital “Web of Science”, considerando los artículos publicados a partir de enero de 2004, con el objetivo de focalizar la investigación en los artículos más recientes. El criterio principal empleado para la selección de artículos aplicado en el motor de búsqueda web fue “*robust optimization*”. Además, se añadieron los siguientes criterios de filtrado, para poder cribar los artículos que trataran problemas de planificación de la producción: *MRP*, *material requirement planning*, *manufacturing resource planning*, *master planning*, *master schedule*, *lot sizing*, *multi-level lot sizing*, *production plan*, *production planning*, *supply chain* y *supply chain plan*, que pueden considerarse los problemas principales dentro del área de planificación de la producción (Mula et al. 2006; Díaz-Madroño et al. 2015).

A las referencias obtenidas por el motor web, según los criterios de búsqueda anteriormente descritos, se realizó un proceso de revisión de sus resúmenes para desestimar los artículos que no trataran sobre programación robusta aplicada a modelos de planificación de la producción. Además, la bibliografía obtenida ha servido para la búsqueda continua de nuevas referencias, seleccionando, finalmente, para el presente trabajo 44 artículos.

Como se muestra en la Tabla 2.1, el 86% de los artículos revisados en este trabajo proceden de revistas científicas, siendo las publicaciones *Applied Mathematical Modelling*, *Computers & Chemical Engineering* y *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* las que aportan un mayor número de artículos a esta revisión bibliográfica. En cuanto a los trabajos procedentes de conferencias, se considera un total de 6 artículos, lo que supone el restante 12% del total de artículos revisados.

Tabla 2.1. Distribución de referencias por publicación

Publicación	Número de referencias	% del total
Applied Mathematical Modelling	6	14%
Computers & Chemical Engineering	4	9%
Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	3	7%
European Journal of Operational Research	3	7%
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	3	7%
Computers & Operations Research	2	5%
Industrial & Engineering Chemistry Research	2	5%
International Journal of Production Economics	2	5%
2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering	1	2%
2008 Fourth International Conference on Natural Computation	1	2%
2008 International Conference on Machine Learning and Cybernetics	1	2%
2009 International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE 2009	1	2%
2009 International Conference on Management of e-Commerce and e-Government	1	2%
2010 International Conference on Management Science & Engineering 17th Annual	1	2%
Annals of Operations Research	1	2%
Assembly Automation	1	2%
Information Sciences	1	2%
International Journal of Engineering	1	2%
International Journal of Industrial Engineering Computations	1	2%
International Journal of Production Research	1	2%
Journal of Intelligent Manufacturing	1	2%
Journal of Systems Science and Systems Engineering	1	2%
Mathematical Methods of Operations Research	1	2%
Optimization Letters	1	2%
OR Spectrum	1	2%
Production Planning and Control	1	2%
Transportation Research Part B: Methodological	1	2%
TOTAL	44	100%

2.3 Criterios de clasificación

El análisis de la revisión bibliográfica para la clasificación de las distintas fuentes consultadas se ha basado en los criterios que se describen a continuación.

2.3.1 Tipo de problema

Basado en los trabajos de Díaz-Madroñero et al. (2015) y Mula et al. (2006) los problemas de planificación de la producción se pueden clasificar en:

- Planificación agregada de la producción (PAP).

La planificación agregada especifica la producción de unidades de familias de productos, niveles de inventario y las capacidades de producción necesarias (incluyendo horas extras) en cada período de planificación a lo largo del horizonte de planificación (Masud & Hwang 1980).

- Planificación maestra de la producción (PMP).

El plan maestro de producción procede del plan agregado y detalla las cantidades a producir de los distintos productos en cada periodo a lo largo del horizonte de planificación.

- Planificación de los requerimientos de materiales y recursos (MRP).

Se basa en la explosión de la lista de materiales mediante la cual se traduce el plan de producción de un producto final a cantidades e instantes de tiempo necesarios, mediante la consideración de las cantidades disponibles en inventario y los tiempos de suministro de los diferentes componentes o materiales (Orlicky 1975; Vollmann et al. 2005; Hopp y Spearman 2011).

- Planificación de la cadena de suministro (Supply Chain Planning - SCP).

Consiste en la gestión del flujo de materiales y de información asociada entre proveedores y clientes, incluyendo la previsión de la demanda, la proyección de inventarios y la estimación de las necesidades de distribución (Cowdrick 1995).

- Planificación jerárquica de la producción.

La distinción de niveles diferentes de planificación basados sobre el período temporal y el nivel de detalle de los planes de producción es conocida como planificación jerárquica de la producción (Hax y Meal, 1975) y (Hax y Candea, 1984). Se persigue obtener soluciones sub-óptimas con tiempos computacionales razonables.

Además de los tipos de problemas descritos anteriormente, en los trabajos revisados se estudian dos nuevos tipos de problemas:

- Secuenciación de la producción (SP).

Establece el orden de las operaciones asociadas a los diferentes centros de trabajo.

- Planificación de sistemas de fabricación flexibles (SFF)

Los sistemas de fabricación flexibles permiten procesar automáticamente diferentes componentes o productos.

En la Tabla 2.2 se detallan los diferentes tipos de problema abordados en los trabajos revisados.

Tabla 2.2. Tipo de problema

	PAP	SP	PMP	SCP	SFF
Leung (2004)	•				
Leung (2007)	•				
Ng (2007)			•		
Xu (2007)				•	
Boni (2008)				•	
Yan (2008)				•	
Wang (2008)				•	
Jafari (2009)				•	
Li (2009)				•	
Xu (2009)				•	
Zuo (2009)		•			
Gharakhani (2010)			•		
Ng (2010)				•	
Ni Na (2010)				•	
Pishvaei (2011)				•	
Ben Tal (2011)				•	
Bredstrom (2011)				•	
Al-e-hashem (2011)	•				
Verderame (2011)				•	
Li (2011)		•	•		
Alem (2012)			•		
Kawas (2013)			•		
Mahmoudzadeh (2013)				•	
Rahmani (2013)			•		
Aouam (2013)	•				
Carlsson (2014)				•	
Hatefi (2014)				•	
Baud-Lavigne (2014)				•	
Ghaffari-Nasab (2014)				•	
Jabbarzadeh (2014)				•	
Mardaneh (2014)	•				
Tavakkoli (2014)		•	•		•

	PAP	SP	PMP	SCP	SFF
Tong (2014)				•	
Zokaei (2014)				•	
Rabbani (2015)	•				
Akbari (2015)				•	
Amaran (2015)		•			
Dubey (2015)				•	
Li (2015)		•	•		
Paul (2015)				•	
Pishvaei (2015)				•	
Sakhaii (2015)		•	•		•
Hasani (2016)				•	
Ardjmand (2016)	•				

Como se puede observar en la Tabla 2.2, la mayoría de los artículos revisados tratan sobre problemas de SCP. Un total de 26 autores incluyen este tipo de problema en sus trabajos (Xu et al. 2007; Boni & Ben-Tal 2008; Yan et al. 2008; Wang et al. 2008; Jafari-Eskandari et al. 2009; Li & Marlin 2009; Xu et al. 2009; Ng et al. 2010; Ni-na & Bao-wen 2010; Pishvaei et al. 2011; Aharon Ben-Tal et al. 2011; Verderame & Floudas 2011; Mahmoudzadeh et al. 2013; Carlsson et al. 2014; Hatefi & Jolai 2014; Baud-Lavigne et al. 2014; Ghaffari-Nasab et al. 2014; Jabbarzadeh et al. 2014; Tong et al. 2014; Zokaei et al. 2014; Akbari & Karimi 2015; Dubey et al. 2015; Pishvaei & Fazli Khalaf 2015; Hasani & Khosrojerdi 2016). Hay cuatro autores que plantean más de un tipo de problema en sus artículos, que son Li (2011) y Li & Li (2015), cuyos trabajos emplean SP y PMP y Tavakkoli-Moghaddam (2014) y Sakhaii (2015) que proponen problemas del tipo SP, PMP y SCP. El segundo tipo de problema que se ha planteado mayor número de veces es el de PP, desarrollado en un total de 9 artículos (Ng & Fowler 2007; Gharakhani 2010; Li et al. 2011; José Alem & Morabito 2012; Kawas et al. 2013; Rahmani et al. 2013; Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii & Vatani 2014; Li & Li 2015; Sakhaii et al. 2015). Un total de 7 artículos abordan problemas de PAP (Leung & Wu 2004; Leung et al. 2007; Mirzapour Al-e-hashem et al. 2011; Aouam & Brahimi 2013; Rabbani et al. 2015; Ardjmand et al. 2016), mientras que 6 trabajos estudian problemas de SP (Zuo et al. 2009; Li et al. 2011; Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii & Vatani 2014; Amaran et al. 2015; Li & Li 2015; Sakhaii et al. 2015). Por último, cabe destacar que sólo dos artículos (Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii & Vatani 2014; Sakhaii et al. 2015) consideran problemas de SFF.

2.3.2 Enfoque de modelado

El enfoque de modelado consiste en el tipo de representación de las relaciones matemáticas y otros aspectos considerados del sistema de producción, permitiendo obtener un fin concreto, como puede ser la minimización de costes o la maximización de beneficios.

En este apartado se describen los modelos principales empleados en programación robusta, clasificados en el orden de su publicación.

2.3.2.1 Soyster (1973)

Según Cuadrado (2013), la primera aproximación a la programación robusta la realizó Soyster (1973), con el objetivo de obtener un modelo de optimización lineal cuyas soluciones son factibles para todos los datos pertenecientes a un conjunto convexo. Dado el siguiente problema de optimización lineal:

$$\max c^T x \quad (2.1)$$

s.a

$$\sum_j^n A_j x_j \leq b \quad \forall A_j \in K_j, j = 1, \dots, n \quad (2.2)$$

$$x \geq 0 \quad (2.3)$$

Donde el conjunto de incertidumbres K_j se considera convexo, Soyster (1973) propone el siguiente modelo equivalente:

$$\max c^T x \quad (2.4)$$

s.a

$$\sum_j^n \bar{A}_j x_j \leq b \quad \forall \bar{A}_j \in K_j, j = 1, \dots, n \quad (2.5)$$

$$x \geq 0 \quad (2.6)$$

Donde $\bar{a}_{i,j} = [A_{i,j}]$, $A_j \in K_j$. Por lo tanto, la matriz \bar{A} está compuesta por los valores más extremos de cada uno de los parámetros sujetos a incertidumbre.

Este enfoque asegura que las soluciones del modelo serán siempre factibles para cualquier variación de los parámetros inciertos, siempre que dichos parámetros varíen dentro del conjunto especificado.

2.3.2.2 Mulvey et al. (1995)

Según Xu et al. (2007), Mulvey et al. (1995) abordan el problema de conseguir soluciones robustas a problemas con entornos estocásticos. Basado en el enfoque típico de la programación estocástica, se definen x variables de diseño cuyos valores óptimos son independientes de la incertidumbre. Por otro lado, se definen como y las variables de control que se pueden ajustar cuando los parámetros relacionados con la incertidumbre varían. El valor óptimo de las variables de control dependen tanto de los parámetros asociados a la incertidumbre como de las variables de diseño.

Dado un caso estándar de programación lineal:

$$\min cx + dy \quad (2.7)$$

s.a

$$Ax = b \quad (2.8)$$

$$Ex + Fy = g \quad (2.9)$$

$$x, y \geq 0 \quad (2.10)$$

donde c, d, A, b, E, F y g son los parámetros que definen las entradas (*inputs*) del modelo. La primera restricción define que las variables de diseño son independientes de la incertidumbre. Las otras restricciones representan las restricciones de control, cuyos coeficientes pueden estar sujetos a la incertidumbre.

A continuación, se define $PS = \{1, 2, \dots, S\}$ como un conjunto de escenarios posibles futuros, con una probabilidad de ocurrencia p_s tal que $\sum_{s \in PS} p_s = 1$. Además, para cada $s \in PS$ se define el conjunto de coeficientes correspondientes a las restricciones de control $\{E_s, F_s, d_s, g_s\}$ y la función objetivo.

Una solución óptima en programación lineal se considera que es robusta si se mantiene próxima al óptimo para cualquier conjunto de valores $s \in PS$ (escenarios). Si esta solución se mantiene "casi" factible para cualquier valor $s \in PS$, se considera que es un modelo robusto. Sin embargo, es poco probable que una solución del problema siga siendo factible y óptima para cualquier conjunto de $s \in PS$. Es, por ello, necesario que un modelo robusto permita el equilibrio entre una buena solución y la robustez del propio modelo.

Sea el conjunto de variables de control $\{y_1, y_2, \dots, y_s\}$ para cada escenario $s \in PS$. No hay garantía de que en cada escenario las variables de control puedan cumplir las restricciones dadas. Por lo tanto, se considera el siguiente modelo robusto:

$$\min \sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s) + \omega \rho(e_1, e_2, \dots, e_s) \quad (2.10)$$

s.a

$$Ax = b \quad (2.11)$$

$$E_s x + F_s y + e_s = g_s \quad (2.12)$$

$$x, y \geq 0 \quad (2.13)$$

donde el primer término de la función objetivo mide la robustez en la solución y el segundo la robustez del modelo. El coeficiente ω mide la importancia de obtener una solución robusta frente a un modelo robusto.

Cabe destacar que el coste de la función es variable $\sigma(x, y_1, y_2, \dots, y_s)$, así como la función que sanciona la factibilidad del mismo $\rho(e_1, e_2, \dots, e_s)$, empleada para penalizar la violación de las restricciones de control.

2.3.2.3 Ben-Tal (1998)

De acuerdo con Cuadrado (2013), este enfoque pretende gestionar el exceso de conservadurismo de Soyster (1973) centrándose en las restricciones que deben cumplirse para cualquier parámetro, pero dentro de un conjunto definido de incertidumbre y sin tener que sacrificar en exceso la optimalidad de las soluciones. A continuación, se muestra el modelo planteado:

$$\max c^T x \quad (2.13)$$

s.a

$$\sum_j a_{i,j} x_j + \sum_{j \in J_t} \hat{a}_{i,j} y_{i,j} + \omega_i \sqrt{\sum_{j \in J_t} \hat{a}_{i,j}^2 z_{i,j}^2} \leq b_i \quad \forall i \quad (2.14)$$

$$-y_{i,j} \leq x_j - z_{i,j} \leq y_{i,j} \quad \forall i, j \in J_i \quad (2.15)$$

$$l \leq x \leq u \quad (2.16)$$

$$y \geq 0 \quad (2.17)$$

siendo U el conjunto de parámetros sujetos a la incertidumbre, la probabilidad de que la i -ésima restricción sea violada podría tomar el valor máximo de $e^{-\frac{\omega_i^2}{2}}$. Este modelo es menos conservador que el propuesto por Soyster (1973) ya que no todas las soluciones son factibles. Este modelo propone descartar los escenarios más pesimistas, es decir, aquellos donde la mayoría de los parámetros sujetos a incertidumbre tomarán los valores más extremos.

En este enfoque se incluye además el parámetro ω_i , el cual permite regular el grado de conservadurismo que se desea aplicar a cada restricción, pero sin tener que sacrificar por ello en exceso la optimalidad de las soluciones.

No obstante, este modelo presenta una estructura no lineal (al contrario que el modelo planteado originalmente por Soyster (1973)). Este hecho implica una mayor complejidad del modelo, además de dificultar considerablemente la resolución del mismo al no poder utilizar las herramientas empleadas en la programación lineal.

2.3.2.4 Bertsimas y Sim (2004)

Según Cuadrado (2013), el enfoque de modelado robusto de Bertsimas & Sim (2004) fue desarrollado con el objetivo de conseguir modelos lineales (aprovechando las ventajas de los mismos con respecto a los modelos no lineales) y a su vez permitir que la solución permanezca próxima a la óptima, sin llegar al exceso de conservadurismo que presentaban los primeros enfoques de programación robusta. Es, por ello, que se define el modelo de datos U , que contiene los elementos sujetos a la variabilidad.

Se considera que la i -ésima restricción del problema nominal $a_i^t x \leq b_i$ puede representar la variabilidad por medio de sus parámetros $a_{i,j}$. Siendo J_i el conjunto de coeficientes de $a_{i,j}$, con $j \in J_i$, los parámetros que están sujetos a la incertidumbre, lo que implica que $\tilde{a}_{i,j}$ toma valores de acuerdo a una distribución simétrica con una media igual al valor del nominal de $a_{i,j}$ en el intervalo $[a_{i,j} - \hat{a}_{i,j}, a_{i,j} + \hat{a}_{i,j}]$.

Para cada restricción i se introduce un parámetro Γ_i , no entero necesariamente, que puede tomar valores en el intervalo $[0, |J_i|]$. El parámetro Γ_i tiene como función ajustar el nivel de protección que se desea asumir para la i -ésima restricción del modelo, en donde a mayor valor del parámetro Γ_i mayor será el nivel de protección que se estará tomando respecto de esta restricción (Bertsimas y Sim, 2004). Cabe destacar que es improbable que todos los coeficientes $a_{i,j}$ con $j \in J_i$ varíen, por lo que se permite que sólo un número $\lfloor \Gamma_i \rfloor$ (mayor entero menor o igual a Γ_i) de parámetros varíe a la vez. Por lo tanto, el modelo propuesto es el siguiente:

$$\max c^T x \quad (2.18)$$

s.a

$$\sum_j a_{i,j} x_j + \max_{\{S_i \cup \{t_i\} | S_i \subseteq J_i, |S_i| = \lfloor \Gamma_i \rfloor, t_i \in J_i \setminus S_i\}} \left(\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{i,j} y_j + (\Gamma_i - \lfloor \Gamma_i \rfloor) \hat{a}_{i,t_i} y_{t_i} \right) \leq b_i \quad \forall i \quad (2.19)$$

$$-y_i \leq x_j \leq y_i \quad \forall j \quad (2.20)$$

$$l \leq x \leq u \quad (2.21)$$

$$y \geq 0 \quad (2.22)$$

Donde se observa que si Γ_i se elige entero, la i -ésima restricción se encontrará protegida por $\beta_i(x, \Gamma_i) = \max_{\{S_i | S_i \subseteq J_i, |S_i| = \Gamma_i\}} \left(\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{i,j} |x_j| \right)$. Para el valor del parámetro $\Gamma_i = 0$ se obtiene $\beta_i(x, 0) = 0$, lo que implica que las restricciones coincidirían con las restricciones del problema nominal. Cuando el valor del parámetro $\Gamma_i = |J_i|$ se obtendría el mismo resultado que en el enfoque de Soyster (caso más desfavorable). Por lo tanto, al variar $\Gamma_i \in [0, |J_i|]$ se puede ajustar el nivel de robustez del modelo frente al nivel de conservadurismo de la solución.

El modelo anterior es no lineal, pero una ventaja de este enfoque de modelado es la posibilidad de transformar dicho modelo en un modelo lineal, a partir de la siguiente definición:

Dado el vector x^* , la función de protección de la i -ésima restricción sería:

$$\beta_i(x^*, \Gamma_i) = \max_{\{S_i \cup \{t_i\} | S_i \in J_i, |S_i| + |\Gamma_i|, t_i \in J_i \setminus S_i\}} \left(\sum_{j \in S_i} \hat{a}_{i,j} |x_j^*| + (\Gamma_i - |\Gamma_i|) \hat{a}_{i,t_i} |x_j^*| \right) \quad (2.23)$$

Cuyo valor es igual a la función objetivo del problema de programación lineal siguiente:

$$\beta_i(x^*, \Gamma_i) = \max \sum_{j \in J_i} \hat{a}_{i,j} |x_j^*| z_{i,j} \quad (2.24)$$

s.a

$$\sum_{j \in J_i} z_{i,j} \leq \Gamma_i \quad (2.26)$$

$$0 \leq z_{i,j} \leq 1 \quad \forall j \in J_i \quad (2.27)$$

Y tiene como dual:

$$\min \sum_{j \in J_i} p_{i,j} + z_i \Gamma_i \quad (2.28)$$

s.a

$$z_i + p_{i,j} \geq \hat{a}_{i,j} |x_j^*| \quad \forall i, j \in J_i \quad (2.29)$$

$$p_{i,j} \geq 0 \quad \forall i, j \in J_i \quad (2.30)$$

$$z_i \geq 0 \quad \forall i \quad (2.31)$$

Si se reemplaza el problema dual en la expresión planteada inicialmente se obtiene un problema equivalente de tipo lineal:

$$\max c^T x \quad (2.32)$$

s.a.

$$\sum_j a_{i,j} x_j + z_i \Gamma_i + \sum_{j \in J_i} p_{i,j} \leq b_i \quad \forall i \quad (2.33)$$

$$z_i + p_{i,j} \geq \hat{a}_{i,j} y_j \quad \forall i, j \in J_i \quad (2.34)$$

$$-y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \quad (2.35)$$

$$l_j \leq x_j \leq u_j \quad \forall j \quad (2.36)$$

$$p_{i,j} \geq 0 \quad \forall i, j \in J_i \quad (2.37)$$

$$y_j \geq 0 \quad \forall j \quad (2.38)$$

$$z_i \geq 0 \quad \forall i \quad (2.39)$$

Entre las ventajas de este enfoque está la baja complejidad de su modelado. No obstante, este enfoque puede presentar problemas cuando los parámetros con variabilidad tienen relación entre sí (principalmente, cuando para que el valor de un parámetro pueda aumentar otros valores deben disminuir), al no poder aplicar la formulación equivalente basada en el problema dual directamente.

A continuación se enumeran y codifican los enfoques diferentes de modelado utilizados en los artículos revisados (Tabla 2.3).

Tabla 2.3. Tipos de enfoque de modelado

Enfoque de modelado	Código
Ben-Tal (1998)	BT
Mulvey (1995)	MU
Adida & Perakis (2010)	AP
Bertsimas (2004)	BE
Bredström (2011)	BR
Chiu & Chiu (2006)	CC
Dimitris & Melvyn (2004)	DM
H. Chtourou (2008)	HC
Li (2009)	LI
Pishvae (2010)	PI
Soyster (1973)	SO
M. Zhang (2006)	MZ
Yu and Li (2000)	YL
Verderame (2009)	VE
Chen (2011)	CH
Alem & Morabito (2012)	AL
No indicado	NI

En la Tabla 2.4 los artículos revisados se clasifican en función del enfoque de modelado empleado.

Tabla 2.4. Enfoque de modelado

	BT	MU	AP	BE	BR	CC	DM	HC	LI	PI	SO	IMZ	YL	VE	CH	AM	NI
Leung (2004)		•															
Leung (2007)													•				
Ng (2007)												•					
Xu (2007)		•															
Boni (2008)	•																
Yan (2008)				•													
Wang (2008)		•					•										
Jafari (2009)				•													
Li (2009)									•								
Xu (2009)							•										
Zuo (2009)								•									
Gharakhani (2010)				•													
Ng (2010)				•													
Ni Na (2010)																	•
Pishvae (2010)	•																
Ben Tal (2011)																	•
Bredstrom (2011)					•												
Al-ehashem (2011)		•															
Verderame (2011)														•			
Li (2011)	•			•													
Alem (2012)				•													
Kawas (2013)	•																
Mahmoudzadeh (2013)			•														
Rahmani (2013)		•				•			•								
Aouam (2013)				•													
Carlsson (2014)					•												
Hatefi (2014)				•													
Baud-Lavigne (2014)																	•
Ghaffari-Nasab (2014)				•													
Jabbarzadeh (2014)		•							•								
Mardaneh (2014)															•		
Tavakkoli (2014)				•													
Tong (2014)				•													
Zokaee (2014)				•													
Rabbani (2015)				•												•	
Akbari (2015)				•													
Amaran (2015)				•													

	BT	MU	AP	BE	BR	CC	DM	HC	Li	PI	SO	IMZ	YL	VE	CH	AM	NI
Dubey (2015)				•							•						
Li (2015)									•								
Paul (2015)	•																
Pishawee (2015)										•							
Sakhaii (2015)				•													
Hasani (2016)				•													
Ardjmand (2016)				•													

Entre los primeros estudios basados en programación robusta está el trabajo publicado por Soyster (1973), que como anteriormente se ha señalado, se basa en la resolución del caso más desfavorable.

Como se puede observar en la Tabla 2.4, hay 3 tipos de modelado predominantes. El enfoque de modelado más empleado es el de Bertsimas y Sim (2004), el cual se desarrolla en diferentes artículos (Bertsimas & Sim 2004; Bertsimas & Thiele 2004; Bertsimas & Thiele 2006). Hay un total de 19 artículos basados en este enfoque de modelado (Yan et al. 2008; Jafari-Eskandari et al. 2009; Gharakhani 2010; Ng et al. 2010; Li et al. 2011; José Alem & Morabito 2012; Aouam & Brahimi 2013; Hatefi & Jolai 2014; Ghaffari-Nasab et al. 2014; Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii & Vatani 2014; Tong et al. 2014; Zokaee et al. 2014; Rabbani et al. 2015; Akbari & Karimi 2015; Amaran et al. 2015; Dubey et al. 2015; Sakhaii et al. 2015; Hasani & Khosrojerdi 2016; Ardjmand et al. 2016).

Los siguientes enfoques de modelado más empleados son el de Mulvey et al. (1995) y el de Ben-Tal & Nemirovski (1998). Diversos autores utilizan el enfoque de modelado de Mulvey et al. (1995) en sus artículos (Leung & Wu 2004; Jiawang & Xiaoyuan 2006; Wang et al. 2008; Mirzapour Al-e-hashem et al. 2011; Rahmani et al. 2013; Jabbarzadeh et al. 2014). Por otro lado, los autores (Boni & Ben-Tal 2008; Pishvae et al. 2011; Li et al. 2011; Kawas et al. 2013; Paul & Wang 2015), utilizan el enfoque de modelado de Ben-Tal & Nemirovski (1998).

Los artículos restantes (Leung et al. 2007; J. Xu et al. 2007; Xu et al. 2009; Zuo et al. 2009; Ng et al. 2010; Mahmoudzadeh et al. 2013; Carlsson et al. 2014; Rahmani et al. 2014; Pishvae & Fazli Khalaf 2015; Li & Li 2015; Kawas et al. 2013) emplean un enfoque de modelado basado en artículos de otros autores.

Por último, varios artículos (Ni-na & Bao-wen 2010; Bredström et al. 2011; A. Ben-Tal et al. 2011; Baud-Lavigne et al. 2014) emplean un enfoque propio o no indican el enfoque en el que están basados.

Cabe destacar que varios autores mencionados (Wang et al. 2008; Li et al. 2011; Rahmani et al. 2013; Jabbarzadeh et al. 2014; Zokaee et al. 2014; Dubey et al. 2015) desarrollan en sus trabajos más de un enfoque, como se puede observar en la Tabla 2.4, con el objetivo de comparar los distintos resultados obtenidos.

2.3.3 Fuentes de incertidumbre

Como indica Peidro et al. (2009) las fuentes de incertidumbre se pueden clasificar en 3 grupos:

- Demanda

La incertidumbre en la demanda es provocada por su volatilidad o por previsiones incorrectas de la misma. Puede estar en función de la cantidad o el tiempo.

- Proceso/producción

La incertidumbre en el proceso es el resultado de la no fiabilidad del proceso de producción, causada, por ejemplo, por paros de máquina.

- Suministro

La incertidumbre en el suministro es causada por la variabilidad provocada por el proveedor en sus operaciones, debido a los fallos o retrasos en las entregas del mismo.

En la Tabla 2.5 se detallan los distintos tipos de incertidumbre consideradas en los artículos revisados.

Tabla 2.5: Tipo de incertidumbre considerada

	Demanda	Proceso	Suministro
Leung (2004)	•	•	
Leung (2007)	•	•	
Ng (2007)	•	•	•
Xu (2007)	•		•
Boni (2008)	•		
Yan (2008)	•		
Wang (2008)	•	•	
Jafari (2009)	•		
Li (2009)	•	•	•
Xu (2009)		•	
Zuo (2009)		•	
Gharakhani (2010)		•	
Ng (2010)		•	
Ni Na (2010)	•		•
Pishvaei (2011)	•	•	•
Ben Tal (2011)	•		
Bredstrom (2011)	•		
Al-e-hashem (2011)	•	•	
Verderame (2011)	•		•
Li (2011)	•		
Alem (2012)	•	•	

	Demanda	Proceso	Suministro
Kawas (2013)		•	
Mahmoudzadeh (2013)	•	•	
Rahmani (2013)	•	•	
Aouam (2013)	•		
Carlsson (2014)	•		•
Hatefi (2014)	•	•	•
Baud-Lavigne (2014)	•	•	•
Ghaffari-Nasab (2014)	•		•
Jabbarzadeh (2014)	•		•
Mardaneh (2014)	•	•	
Tavakkoli-Moghaddam (2014)		•	
Tong (2014)	•	•	•
Zokaei (2014)		•	•
Rabbani (2015)	•	•	
Akbari (2015)		•	
Amaran (2015)		•	•
Dubey (2015)	•		
Li (2015)	•		
Paul (2015)	•	•	•
Pishvaei (2015)			•
Sakhaii (2015)		•	
Hasani (2016)	•	•	•
Ardjmand (2016)	•		

De los artículos revisados, la fuente principal de incertidumbre abordada es la demanda, con 36 artículos, seguida de la incertidumbre en el proceso con 25. Por último, hay un total de 22 artículos que consideran la incertidumbre en el suministro. No obstante, varios autores consideran más de una fuente de incertidumbre. Entre los que tienen en cuenta la incertidumbre tanto en la demanda como en el proceso y el suministro están Ng & Fowler (2007); Li & Marlin (2009); Pishvaei et al. (2011); Hatefi & Jolai (2014); Baud-Lavigne et al. (2014); Paul & Wang (2015); Tong et al. (2014); Hasani & Khosrojerdi (2016)). Los autores que consideran incertidumbre sólo en la demanda y en el proceso son: Leung & Wu (2004); Leung et al. (2007); Wang et al. (2008); Mirzapour Al-e-hashem et al. (2011); Mahmoudzadeh et al. (2013); Alem & Morabito (2012); Rahmani et al. (2013); Mahmoudzadeh et al. (2013); Mardaneh et al. (2014); Rabbani et al. (2015). Por otro lado, los autores: Verderame & Floudas (2011); Ni-na & Bao-wen (2010); Ghaffari-Nasab et al. (2014); Xu et al. (2007); Jabbarzadeh et al. (2014) y Carlsson et al. (2014) consideran la incertidumbre en la demanda y el suministro, sin tener en cuenta la incertidumbre en el proceso. Por último, sólo dos autores (Zokaei et al. 2014; Amaran et al. 2015) tienen en cuenta la incertidumbre en el proceso y en el suministro, no considerado la incertidumbre en la demanda. Además, Kawas et al. (2013)

consideran como fuente de incertidumbre el riesgo de una empresa de fallar las inspecciones de las autoridades por no cumplir las normativas vigentes propias de su sector.

2.3.4 Estructura de la función objetivo

De acuerdo con Díaz-Madroñero et al. (2015), para los problemas de planificación de la producción y el transporte, las estructuras más empleadas en la formulación de la función objetivo persiguen conseguir un determinado nivel de servicio, la reducción de costes y la maximización del beneficio total. Los aspectos empleados en las funciones objetivo de los diferentes artículos son los siguientes:

- Costes productivos (CPRO).
- Costes de preparación (CPRE).
- Costes de suministro (CSU).
- Costes de mano de obra (CMO).
- Costes de inventario (CINV).
- Costes de contratación y despido (CCD).
- Costes de ruptura de stock (CRS).
- Costes de no calidad (CNC).
- Costes de inspección no superada (CINS).
- Costes de distribución de células (CDIS).
- Costes de mantenimiento (CMA).
- Coste por avería (CAV).
- Costes de ajustes de precios (CAP).
- Costes de aumento de capacidad (CAC).
- Costes de gestión (CGE).
- Capacidad de inventario (CAPI).
- Beneficios (B).
- Cantidad de producción (CP).
- Desviación de secuencia (DS).

En la Tabla 2.6 y Tabla 2.7 se enumeran los distintos términos que componen la función objetivo de los diferentes trabajos revisados.

Tabla 2.6. Componentes de coste de las funciones objetivo empleadas

	CPRO	CPRE	CSU	CMO	CINV	CCD	CRS	CNC	CINS	CDIS	CMA	CAV	CAP	CAC	CGE
Leung (2004)	•			•	•	•									

	CPRO	CPRE	CSU	CMO	CINV	CCD	CRS	CNC	CINS	CDIS	CMA	CAV	CAP	CAC	CGE
Leung (2007)	•			•	•	•									
Ng (2007)					•		•								
Xu (2007)	•	•	•		•		•								•
Boni (2008)	•				•		•								
Yan (2008)							•								
Wang (2008)	•		•				•								•
Jafari (2009)			•		•										
Li (2009)	•		•		•		•								
Xu (2009)	•	•	•				•								
Zuo (2009)															
Gharakhani (2010)														•	
Ng (2010)					•		•								
Ni Na (2010)	•				•		•								
Pishvae (2011)			•		•		•								
Ben Tal (2011)			•				•								
Bredstrom (2011)	•		•		•										
Al-e-hashem (2011)	•		•	•	•	•	•								
Verderame (2011)			•		•		•								
Li (2011)	•							•							
Alem (2012)	•	•					•								
Kawas (2013)									•						
Mahmoudzadeh (2013)	•		•		•										
Rahmani (2013)	•		•	•	•	•	•								
Aouam (2013)	•		•		•		•								
Carlsson (2014)			•		•										
Hatefi (2014)	•		•				•								
Baud-Lavigne (2014)	•		•	•	•										
Ghaffari-Nasab (2014)					•										
Jabbarzadeh (2014)	•		•		•		•								
Mardaneh (2014)	•				•								•		
Tavakkoli (2014)	•		•		•		•								
Tong (2014)	•		•		•						•				
Zokaee (2014)			•		•		•								
Rabbani (2015)	•	•			•			•			•	•			
Akbari (2015)	•		•		•										
Amaran (2015)				•	•		•								
Dubey (2015)	•	•	•		•		•							•	
Li (2015)	•			•											

	CPRO	CPRE	CSU	CMO	CINV	CCD	CRS	CNC	CINS	CDIS	CMA	CAV	CAP	CAC	CGE
Paul (2015)			•												
Pishawee (2015)	•						•								
Sakhaii (2015)	•			•		•	•			•		•			
Hasani (2016)	•		•		•		•								
Ardjmand (2016)	•				•		•								

Tabla 2.7. Otros componentes de las funciones objetivo empleadas

	CAPI	B	CP	DS
Leung (2004)				
Leung (2007)				
Ng (2007)	•			
Xu (2007)				
Boni (2008)				
Yan (2008)		•		
Wang (2008)	•			
Jafari (2009)				
Li (2009)				
Xu (2009)	•			
Zuo (2009)				•
Gharakhani (2010)			•	
Ng (2010)				
Ni Na (2010)		•		
Pishvae (2011)				
Ben Tal (2011)				
Bredstrom (2011)				
Al-e-hashem (2011)				
Verderame (2011)				
Li (2011)		•		
Alem (2012)				
Kawas (2013)		•		
Mahmoudzadeh (2013)		•		
Rahmani (2013)				
Aouam (2013)				
Carlsson (2014)				
Hatefi (2014)				

	CAPI	B	CP	DS
Baud-Lavigne (2014)				
Ghaffari-Nasab (2014)				
Jabbarzadeh (2014)				
Mardaneh (2014)		•		
Tavakkoli (2014)				
Tong (2014)				
Zokae (2014)				
Rabbani (2015)			•	
Akbari (2015)				
Amaran (2015)		•		
Dubey (2015)				
Li (2015)		•		
Paul (2015)				
Pishawee (2015)				
Sakhaii (2015)				
Hasani (2016)		•		
Ardjmand (2016)		•		

Como se puede observar en la Tabla 2.6, los componentes más empleados en las funciones objetivo de los trabajos revisados son los costes por inventario, productivos, de suministro y por ruptura de stock. En total, 30 artículos revisados incluyen los costes por inventario (Leung & Wu 2004; Leung et al. 2007; Ng & Fowler 2007; Xu et al. 2007; Boni & Ben-Tal 2008; Jafari-Eskandari et al. 2009; Li et al. 2009; Ng et al. 2010; Ni-na & Bao-wen 2010; Pishvae et al. 2011; Bredström et al. 2011; Mirzapour Al-e-hashem et al. 2011; Verderame & Floudas 2011; Mahmoudzadeh et al. 2013; Rahmani et al. 2013; Aouam & Brahimi 2013; Carlsson et al. 2014; Baud-Lavigne et al. 2014; Ghaffari-Nasab et al. 2014; Jabbarzadeh et al. 2014; Mardaneh & Caccetta 2014; Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii & Vatani 2014; Tong et al. 2014; Zokae et al. 2014; Rabbani et al. 2015; Akbari & Karimi 2015; Amaran et al. 2015; Dubey et al. 2015; Hasani & Khosrojerdi 2016; Ardjmand et al. 2016). En cuanto a costes productivos, son 29 trabajos los que incluyen dicho coste (Leung & Wu 2004; Leung et al. 2007; Xu et al. 2007; Boni & Ben-Tal 2008; Wang et al. 2008; Li et al. 2009; Xu et al. 2009; Ni-na & Bao-wen 2010; Bredström et al. 2011; Mirzapour Al-e-hashem et al. 2011; Li et al. 2011; José Alem & Morabito 2012; Mahmoudzadeh et al. 2013; Rahmani et al. 2013; Aouam & Brahimi 2013; Hatefi & Jolai 2014; Baud-Lavigne et al. 2014; Jabbarzadeh et al. 2014; Mardaneh & Caccetta 2014; Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii & Vatani 2014; Tong et al. 2014; Rabbani et al. 2015; Akbari & Karimi 2015; Dubey et al. 2015; Li & Li 2015; Pishvae & Fazli Khalaf 2015; Sakhaii et al. 2015; Hasani & Khosrojerdi 2016; Ardjmand et al. 2016). Con respecto a trabajos que incluyen costes por ruptura de stock en su función objetivo, hay 26 artículos (Ng & Fowler 2007; Xu et al. 2007; Boni & Ben-Tal 2008; Yan et al. 2008; Wang et al. 2008; Li & Marlin 2009; Xu et al. 2009; Ng et al. 2010; Ni-na & Bao-wen 2010; Pishvae et al. 2011; Aharon Ben-Tal et al. 2011; Mirzapour Al-e-hashem et al. 2011; Verderame & Floudas 2011; José Alem & Morabito 2012; Rahmani et al. 2013; Aouam & Brahimi 2013; Hatefi & Jolai 2014; Jabbarzadeh et al. 2014; Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii & Vatani

2014; Zokaei et al. 2014; Amaran et al. 2015; Dubey et al. 2015; Pishvaei & Fazli Khalaf 2015; Sakhaii et al. 2015; Hasani & Khosrojerdi 2016; Ardjmand et al. 2016). Además, hay un total de 24 artículos que incluyen costes de suministro en su función objetivo: Xu et al. (2007); Wang et al. (2008); Jafari-Eskandari et al. (2009); Li et al. (2009); Xu et al. (2009); Pishvaei et al. (2011); Aharon Ben-Tal et al. (2011); Bredström et al. (2011); Mirzapour Al-e-hashem et al. (2011); Verderame & Floudas (2011); Mahmoudzadeh et al. (2013); Rahmani et al. (2013); Aouam & Brahim (2013); Carlsson et al. (2014); Hatefi & Jolai (2014); Baud-Lavigne et al. (2014); Jabbarzadeh et al. (2014); Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii & Vatani (2014); Tong et al. 2014; Zokaei et al. (2014); Akbari & Karimi (2015); Dubey et al. (2015); Paul & Wang (2015); Hasani & Khosrojerdi (2016).

Con respecto a los trabajos cuya función objetivo incluye la maximización de beneficios, hay un total de 10 artículos (Yan et al. 2008; Ni-na & Bao-wen 2010; Li et al. 2011; Kawas et al. 2013; Mahmoudzadeh et al. 2013; Mardaneh & Caccetta 2014; Amaran et al. 2015; Li & Li 2015; Hasani & Khosrojerdi 2016; Ardjmand et al. 2016).

Por último cabe destacar que hay 6 trabajos cuya función objetivo tiene al menos 6 términos (Xu et al. 2007; Mirzapour Al-e-hashem et al. 2011; Rahmani et al. 2013; Rabbani et al. 2015; Dubey et al. 2015; Sakhaii et al. 2015).

2.3.5 Enfoque de solución

Según la clasificación propuesta por Buschkühl et al. (2010) para modelos de planificación de la producción (aplicada a problemas de *lot-sizing*), se pueden clasificar los distintos enfoques de resolución en 5 grandes grupos:

- Métodos basados en programación matemática:
 - Heurísticas *Branch & Bound*.
 - Reformulaciones.
 - Desigualdades válidas.
 - *Fix & Relax heuristics*.
 - *Rounding heuristics*.
 - Programación lineal (entera o mixta).
 - Programación no lineal.
 - *Dantzig-Wolfe* y generación de columnas.
- Heurísticas lagrangianas:
 - Relajaciones lagrangianas
 - Descomposiciones lagrangianas
- Heurísticas de agregación y descomposición:
 - Descomposiciones basadas en el tiempo.
 - Descomposiciones y agregaciones orientadas a productos.
 - Descomposiciones y agregaciones aplicadas a recursos.

- Metaheurísticas:
 - Búsquedas locales.
 - Búsqueda vecinal variable.
 - Algoritmo de recocido simulado.
 - Búsqueda de tabú.
 - Algoritmos genéticos.
 - Algoritmos miméticos
 - Optimización mediante colonia de hormigas.
- Heurísticas *greedy* para problemas específicos:
 - Heurísticas constructivas *greedy*.
 - Heurísticas de mejora *greedy*.

Además de la clasificación propuesta por Buschkühl et al. (2010), se ha identificado otro tipo de enfoque: la simulación, empleada en los artículos revisados a través de la aplicación del método Montecarlo para la resolución de problemas.

Por otra parte, cabe destacar que en la revisión bibliográfica se aplican las siguientes técnicas metaheurísticas no mencionadas por Buschkühl et al. (2010): Algoritmos inmunológicos, nube de partículas y búsqueda inconsciente. Esta última se basa en la memoria que imita el proceso de la psicoterapia psicoanalítica propuesto por Sigmund Freud, en el que el terapeuta trata de encontrar la causa del trastorno mental de un paciente en inconsciente.

En la Tabla 2.8 se muestra un resumen de los distintos enfoques de solución empleados en los trabajos revisados.

Tabla 2.8. Clasificación de los distintos enfoques de resolución

Enfoque de resolución	Detalle	Referencia
Programación lineal	Programación lineal entera/entera mixta	PLE
	Programación lineal entera/entera fraccional mixta	PLEF
Programación no lineal	Programación no lineal entera/entera mixta	PNLE
Metaheurísticas	Algoritmos genéticos híbridos	AGH
	Algoritmo inmunológico multiobjetivo de zona variable	VNIA
	Nube de partículas	NP
	Algoritmos miméticos híbridos (Taguchi)	AT
	Búsqueda inconsciente	BI
Simulación	Método Montecarlo	MM

La Tabla 2.9 clasifica los distintos trabajos revisados en función del enfoque de solución que emplean.

Tabla 2.9. Enfoque de solución de los distintos trabajos revisados

	PNLE	AGH	PLE	MM	VNIA	PLEF	NP	AT	BI
Leung (2004)			•						
Leung (2007)			•						
Ng (2007)			•						
Xu (2007)			•						
Boni (2008)	•								
Ni Na (2008)			•						
Wang (2008)		•	•						
Jafari (2009)			•						
Li (2009)			•						
Xu (2009)			•						
Zuo (2009)					•				
Gharakhani (2010)			•						
Ng (2010)			•						
Ni Na (2010)			•						
Pishvae (2011)			•						
Ben Tal (2011)			•						
Bredstrom (2011)			•						
Al-e-hashem (2011)	•								
Verderame (2011)			•						
Li (2011)	•		•						
Alem (2012)			•						
Kawas (2013)			•						
Mahmoudzadeh (2013)	•								
Rahmani (2013)			•						
Aouam (2013)			•						
Carlsson (2014)			•						
Hatefi (2014)			•						
Baud-Lavigne (2014)			•						
Ghaffari-Nasab (2014)			•						
Jabbarzadeh (2014)			•						
Mardaneh (2014)	•								
Tavakkoli (2014)	•		•						
Tong (2014)	•					•			
Zokaee (2014)			•						

	PNLE	AGH	PLE	MM	VNIA	PLEF	NP	AT	BI
Rabbani (2015)		•					•		
Akbari (2015)			•	•					
Amaran (2015)			•						
Dubey (2015)			•						
Li (2015)			•						
Paul (2015)			•						
Pishawee (2015)			•						
Sakhaii (2015)			•						
Hasani (2016)	•							•	
Ardjmand (2016)			•						•

Como se puede observar, el enfoque de solución más empleado en los artículos revisados es la PLE, utilizado por un total de 35 autores (Leung & Wu 2004; Leung et al. 2007; Ng & Fowler 2007; J. Xu et al. 2007; Yan et al. 2008; Wang et al. 2008; Jafari-Eskandari et al. 2009; Li et al. 2009; Xu et al. 2009; Gharakhani 2010; Ng et al. 2010; Ni-na & Bao-wen 2010; Pishvae et al. 2011; Aharon Ben-Tal et al. 2011; Bredström et al. 2011; Verderame & Floudas 2011; Li et al. 2011; José Alem & Morabito 2012; Kawas et al. 2013; Rahmani et al. 2013; Carlsson et al. 2014; Hatefi & Jolai 2014; Baud-Lavigne et al. 2014; Ghaffari-Nasab et al. 2014; Jabbarzadeh et al. 2014; Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii & Vatani 2014; Zokaee et al. 2014; Akbari & Karimi 2015; Amaran et al. 2015; Dubey et al. 2015; Li & Li 2015; Paul & Wang 2015; Pishvae & Fazli Khalaf 2015; Sakhaii et al. 2015; Ardjmand et al. 2016).

Además, hay 8 que artículos con enfoque de solución PNLE (Boni & Ben-Tal 2008; Mirzapour Al-e-hashem et al. 2011; Li et al. 2011; Mahmoudzadeh et al. 2013; Mardaneh & Caccetta 2014; Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii, Vatani, et al. 2014; Tong et al. 2014; Hasani & Khosrojerdi 2016).

Los artículos que no emplean un enfoque de solución basado en programación matemática o simulación aplican técnicas metaheurísticas. Dos autores (Wang et al. 2008; Rabbani et al. 2015) resuelven el problema planteado por medio de algoritmos genéticos híbridos, aplicando también Rabbani et al. (2015) una técnica de optimización de NP.

Por otro lado, Hasani & Khosrojerdi (2016) utilizan un algoritmo mimético híbrido basado en técnicas de Taguchi mientras que Zuo et al. (2009) utilizan para resolver el problema planteado en su estudio un algoritmo inmunológico multi-objetivo de zona variable (*multi-objective variable neighborhood immune algorithm* - VNIA) y Ardjmand et al. (2016) la técnica metaheurística de BI descrita anteriormente.

Por último, Akbari & Karimi (2015), además de emplear la PLE utilizan como enfoque de solución las técnicas de simulación de tipo MM.

2.3.6 Herramientas de desarrollo

Las herramientas principales de software empleadas para la resolución de los modelos de planificación propuestos son las siguientes:

- Solvers (CPLEX, LINGO, Gurobi, etc.)
- Lenguajes de programación (C++, Visual C, Basic etc.)
- Lenguajes de optimización y modelado (GAMS, AIMMS, LINDO, MPL, Matlab, etc.)
- Sistemas de simulación (Anylogic, Arena, FMS.net , etc.)

A continuación, se muestra la Tabla 2.10, que recopila los lenguajes de modelado y herramientas de resolución aplicados en los diferentes trabajos revisados y las combinaciones principales entre los mismos.

Tabla 2.10. Lenguajes de modelado empleados y principales combinaciones

Lenguajes de Modelado	Principales Combinaciones	Código tabla 2.9	Referencias
AIMMS	AIMMS + CONOPT	AI+CO	1
	AIMMS + CPLEX	AI+CP	1
AMPL	-	AMPL	1
GAMS	GAMS + DICOPT	GA+DI	1
	GAMS + SBB	GA+SBB	1
	GAMS + BARON	GA+BA	1
	GAMS + LINDO	GA+LI	1
	GAMS + CPLEX	GA+CP	6
MATLAB	MATLAB	MATLAB	7
	MATLAB + BRANCH & BOUND	MAT+BB	1
LINGO	LINDO	LINDO	9
No especificado	-	NE	5

En la Tabla 2.11 se clasifican los distintos artículos revisados en función de las herramientas empleadas para el modelado y resolución.

Tabla 2.11. Herramientas de desarrollo empleadas

	AI+CO	AI+CP	AMPL	GA+DI	GA+SBB	GA+BA	CPLEX	GA+CP	GA+LI	LINDO	LINGO	MATLAB	NE
Leung (2004)										●			
Leung (2007)										●			

	AI+CO	AI +CP	AMPL	GA+ DI	GA+SBB	GA+BA	CPLEX	GA+CP	GA + LI	LINDO	LINGO	MATLAB	NE
Ng (2007)							•						
Xu (2007)												•	
Boni (2008)												•	
Yan (2008)												•	
Wang (2008)											•		
Jafari (2009)													•
Li (2009)								•				•	
Xu (2009)											•		
Zuo (2009)													•
Gharakhani (2010)													•
Ng (2010)							•						
Ni Na (2010)												•	
Pishvae (2011)							•						
Ben Tal (2011)													•
Bredstrom (2011)			•				•						
Al-e-hashem (2011)											•		
Verderame (2011)								•					
Li (2011)												•	
Alem (2012)								•					
Kawas (2013)													
Mahmoudzadeh (2013)							•						
Rahmani (2013)											•		
Aouam (2013)								•					
Carlsson (2014)							•						
Hatefi (2014)								•					
Baud-Lavigne (2014)							•						
Ghaffari-Nasab (2014)							•						
Jabbarzadeh (2014)											•		
Mardaneh (2014)	•	•											
Tavakkoli-Moghaddam								•					
Tong (2014)				•	•	•	•						
Zokaee (2014)											•		
Rabbani (2015)											•		
Akbari (2015)							•						
Amaran (2015)							•						
Dubey (2015)							•						
Li (2015)													•

	AI+CO	AI+CP	AMPL	GA+DI	GA+SBB	GA+BA	CPLEX	GA+CP	GA+LI	LINDO	LINGO	MATLAB	NE
Paul (2015)							•						
Pishawee (2015)							•						
Sakhaii (2015)							•						
Hasani (2016)									•				
Ardjmand (2016)							•						

Como se puede observar en la Tabla 2.11, (Mardaneh & Caccetta 2014) emplean el lenguaje AIMMS para modelar, recurriendo a los algoritmos de resolución CONOPT para la parte no lineal del modelo y CPLEX para la parte lineal entera-mixta. Sin embargo, el lenguaje de modelado más empleado por la mayoría de autores es GAMS, que suele emplearse junto con el algoritmo de resolución CPLEX para resolver problemas con el enfoque de PLE (Xu et al. 2009; Verderame & Floudas 2011; José Alem & Morabito 2012; Aouam & Brahimi 2013; Hatefi & Jolai 2014; Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii, Vatani, et al. 2014) y con el algoritmo DICOPT para problemas con un enfoque de PLE (Tong et al. 2014).

Una de las herramientas más empleadas para el modelado y resolución es MATLAB (Yan et al. 2008; Boni & Ben-Tal 2008; Li et al. 2009; Ni-na & Bao-wen 2010; Li et al. 2011; Zhao et al. 2013). Y en cuanto a solvers, aparte del mencionado CPLEX, LINDO (Leung & Wu 2004; Leung et al. 2007) y LINGO (Wang et al. 2008; Xu et al. 2009; Mirzapour Al-e-hashem et al. 2011; Rahmani et al. 2013; Zokaei et al. 2014; Rabbani et al. 2015).

Por último, cabe señalar que el solver CPLEX es el más empleado para resolver los modelos planteados en los distintos trabajos revisados. En total, 22 de los autores (Ng & Fowler 2007; Li et al. 2009; Ng et al. 2010; Pishvaei et al. 2011; Bredström et al. 2011; Verderame & Floudas 2011; José Alem & Morabito 2012; Mahmoudzadeh et al. 2013; Aouam & Brahimi 2013; Carlsson et al. 2014; Hatefi & Jolai 2014; Baud-Lavigne et al. 2014; Ghaffari-Nasab et al. 2014; Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii & Vatani 2014; Tong et al. 2014; Akbari & Karimi 2015; Amaran et al. 2015; Dubey et al. 2015; Paul & Wang 2015; Pishvaei & Fazli Khalaf 2015; Sakhaii et al. 2015; Ardjmand et al. 2016) emplean dicho solver.

2.3.7 Aplicación

Los modelos propuestos en los artículos revisados pueden ser validados usando datos de sistemas de producción reales o bien por medios de experimentos numéricos generados artificialmente. En este apartado se realiza una clasificación de los distintos trabajos estudiados en función de su campo de aplicación.

En la Tabla 2.12 se incluyen los distintos campos de aplicación incluidos en la bibliografía, así como el código para identificarlos en la Tabla 2.13, donde se indica la aplicación de los distintos artículos revisados.

Tabla 2.12. Codificación de los diferentes campos de aplicación

Aplicación	Código
Automoción	AUTO
Ayuda humanitaria	AYUD
Industria química	QUIM
Refinería	REFIN
Aeronáutica civil	AREO
Electromecánica	EMED
Electrónica/semiconductores	ELECT
Industria alimentaria	ALIME
Fabricación de muebles	MUEB
Central térmica	CENTR
Licitaciones agricultura	AGRIC
Industria papelera	PAPEL
Fabricación de frigoríficos	FRIGO
Industria textil	TEXTIL
Experimentos numéricos	NUME

Tabla 2.13. Aplicación de los trabajos revisados

	AUTO	AYUD	QUIM	REFIN	ARRO	EMED	ELECT	ALIME	MUEB	CENTR	AGRIC	PAPEL	FRIGO	TEXTIL	NUME
Leung (2004)															•
Leung (2007)														•	
Ng (2007)							•								
Xu (2007)							•								•
Boni (2008)														•	
Ni Na (2008)														•	
Wang (2008)															•
Jafari (2009)	•														
Li (2009)															•
Xu (2009)							•								
Zuo (2009)					•										
Gharakhani (2010)															•
Ng (2010)							•								

	AUTO	AYUD	QUIM	REFIN	ARRO	EMED	ELECT	ALIME	IMUEB	CENTR	AGRIC	PAPEL	FRIGO	TEXTIL	NUME
Ni Na (2010)															•
Pishvae (2011)															•
Ben Tal (2011)		•													
Bredstrom (2011)										•					
Al-e-hashem (2011)												•			
Verderame (2011)															•
Li (2011)				•											
Alem (2012)									•						
Kawas (2013)															•
Mahmoudzadeh (2013)							•								
Rahmani (2013)													•		
Aouam (2013)															•
Carlsson (2014)												•			
Hatefi (2014)															•
Baud-Lavigne (2014)															•
Ghaffari-Nasab (2014)															•
Jabbarzadeh (2014)		•													
Mardaneh (2014)															•
Tavakkoli (2014)															•
Tong (2014)			•												
Zokae (2014)								•							
Rabbani (2015)															•
Akbari (2015)															•
Amaran (2015)			•												
Dubey (2015)							•								
Li (2015)															•
Paul (2015)											•				
Pishawee (2015)															•
Sakhaii (2015)															•
Hasani (2016)						•									
Ardjmand (2016)													•		

Como se puede observar en la tabla anterior, prácticamente la mitad de los artículos aplican modelos teóricos o emplean experimentos teóricos. El sector que mayor aplicación tiene entre los artículos revisados es la industria electrónica y de semiconductores, con un total de 6 artículos (Dubey et al. 2015; Mahmoudzadeh et al. 2013; Ng & Fowler 2007; Ng et al. 2010; J. Xu et al. 2007; Xu et al. 2009). Cabe destacar las aplicaciones de la programación robusta en el campo de la ayuda humanitaria, como pueden ser el abastecimiento de sangre en zonas donde ha ocurrido un

desastre natural (Jabbarzadeh et al. 2014) o el despliegue de asistencia humanitaria (Aharon Ben-Tal et al. 2011), casos donde las pérdidas de vidas humanas deben evitarse sin priorizar costes.

2.3.8 Ventajas

En este apartado se recopilan los distintos beneficios de los modelos propuestos en los artículos revisados. Cabe destacar que estas ventajas han sido indicadas por los propios autores en sus trabajos.

Las ventajas principales aportadas por los diferentes estudios se pueden clasificar en:

- Protección frente a la Incertidumbre (PI).
- Aplicación en un entorno real (AR).
- Flexibilidad (FLEX).
- Calidad de la solución/procedimiento (CSP).
- Aumento de beneficios (BEN).
- Mejora del nivel de servicio (MNS).
- Reducción de costes (RC).
- Capacidad de ampliación del modelo (CAM).
- Sensibilidad (SEN).

En la Tabla 2.14, se detallan las distintas ventajas mencionadas por los autores en los trabajos objeto de revisión.

Tabla 2.14: Ventajas indicadas en los trabajos revisados

	AR	CSP	FLEX	BEN	MNS	PI	RC	CAM	SEN
Leung (2004)		•				•	•		
Leung (2007)	•	•							
Ng (2007)		•			•	•	•		
Xu (2007)						•			
Boni (2008)		•				•			
Yan (2008)	•								
Wang (2008)						•			
Jafari (2009)		•				•			
Li (2009)			•			•		•	
Xu (2009)						•			
Zuo (2009)									
Gharakhani (2010)									

	AR	CSP	FLEX	BEN	MINS	PI	RC	CAM	SEN
Ng (2010)		•	•			•	•		
Ni Na (2010)									
Pishvae (2011)		•				•			
Ben Tal (2011)		•				•			
Bredstrom (2011)		•				•	•		
Al-e-hashem (2011)		•				•			•
Verderame (2011)	•	•				•			
Li (2011)		•							
Alem (2012)		•				•			
Kawas (2013)		•	•	•		•			
Mahmoudzadeh (2013)						•			
Rahmani (2013)		•				•			
Aouam (2013)			•	•	•				
Carlsson (2014)			•			•			
Hatefi (2014)						•	•		
Baud-Lavigne (2014)		•	•			•			
Ghaffari-Nasab (2014)						•			
Jabbarzadeh (2014)	•		•			•			
Mardaneh (2014)	•		•			•			
Tavakkoli-Moghaddam (2014)						•			
Tong (2014)									
Zokaee (2014)						•	•		
Rabbani (2015)						•			
Akbari (2015)		•				•			
Amaran (2015)									
Dubey (2015)		•							
Li (2015)		•				•			
Paul (2015)		•	•			•			
Pishawee (2015)									
Sakhaii (2015)		•	•						
Hasani (2016)	•	•				•	•		
Ardjmand (2016)	•	•		•					

De los artículos revisados se puede afirmar que la ventaja que con mayor frecuencia se presenta es la de PI. Es la ventaja principal de la programación robusta y todos los estudios tienen como objetivo último alcanzar la “robustez” en los modelos planteados. La segunda ventaja con mayor número de menciones por parte de los autores es la “calidad de la solución o del procedimiento del modelado propuesto”, seguida de la ventaja “flexibilidad”.

Entre los artículos que mencionan un mayor número de ventajas están (Leung & Wu 2004; Ng & Fowler 2007; Ng et al. 2010; Kawas et al. 2013), con hasta 4 ventajas señaladas. (Liu et al. 2009; Verderame & Floudas 2011; Aouam & Brahimi 2013; Baud-Lavigne et al. 2014; Jabbarzadeh et al. 2014; Mardaneh & Caccetta 2014; Paul & Wang 2015; Bredström et al. 2011; Mirzapour Al-e-hashem et al. 2011) mencionan 3 ventajas en sus modelos. Por último, el resto de autores sólo señalan 2 ventajas o menos.

Se puede observar que entre las ventajas presentadas un gran número de ellas se centran en la reducción de diferentes costes o la maximización de beneficios.

Otro hecho significativo es que sólo 5 estudios (Yan et al. 2008; Jabbarzadeh et al. 2014; Leung et al. 2007; Verderame & Floudas 2011; Mardaneh & Caccetta 2014) mencionan como ventaja su aplicación en casos reales.

2.3.9 Limitaciones

En este apartado se describen las limitaciones señaladas por los autores en los distintos trabajos revisados. Algunas de estas limitaciones están relacionadas, principalmente, con el método de resolución utilizado, el tipo de sistema de producción considerado o la no consideración de parámetros inciertos. Estas limitaciones, habitualmente, son propuestas como mejoras de los modelos propuestos y se identifican en las futuras líneas de trabajo por los investigadores académicos y profesionales.

En la Tabla 2.15 se resumen las limitaciones principales comentadas por los autores en los artículos revisados.

Tabla 2.15. Limitaciones principales indicadas en los artículos revisados

Limitación	Código
Aplicación en entornos no reales	AENR
Baja sensibilidad	BS
Modelo no validado para otros casos o parámetros	MNV
Alto coste	AC
Tiempo de computación alto	TCA
Enfoque de solución mejorable	ESM
Simplicidad del modelo propuesto	SMP
Modelo inacabado	MI
Complejidad proporcional al tamaño del problema	CPTM
Grado de conservadurismo	GC
Demanda considerada cíclica	DCC
Parámetros no considerados	PNC

En la Tabla 2.16 se clasifican los diferentes artículos de acuerdo a las limitaciones indicadas por los diferentes autores.

Tabla 2.16. Limitaciones

	AENR	BS	MNV	AC	TCA	ESM	SMP	MI	CPTM	GC	DCC	PNC
Leung (2004)	•	•	•	•								
Leung (2007)			•	•								
Ng (2007)							•					
Xu (2007)				•								
Boni (2008)												
Yan (2008)								•				
Wang (2008)												
Jafari (2009)	•				•							
Li (2009)												
Xu (2009)							•					
Zuo (2009)												
Gharakhani (2010)												
Ng (2010)		•			•							
Ni Na (2010)												•
Pishvaei (2011)				•			•					•
Ben Tal (2011)							•					•
Bredstrom (2011)												
Al-e-hashem (2011)								•				
Verderame (2011)												•
Li (2011)												
Alem (2012)										•		
Kawas (2013)												
Mahmoudzadeh (2013)	•						•					•
Rahmani (2013)			•				•					
Aouam (2013)												
Carlsson (2013)											•	
Hatefi (2014)									•			•
Baud-Lavigne (2014)					•							
Ghaffari-Nasab (2014)							•					
Jabbarzadeh (2014)												
Mardaneh (2014)												
Tavakkoli (2014)	•			•								•
Tong (2014)				•								
Zokaei (2014)										•		•

	AENR	BS	MNV	AC	TCA	ESM	SMP	MI	CPTM	GC	DCC	PNC
Rabbani (2015)							•					•
Akbari (2015)						•						•
Amaran (2015)												
Dubey (2015)												
Li (2015)												
Paul (2015)												•
Pishawee (2015)												•
Sakhaii (2015)												•
Hasani (2016)												•
Ardjmand (2016)		•										•

Con respecto a los parámetros no considerados, se pueden desagregar los artículos revisados en los campos indicados, como se muestra en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17 Codificación de limitaciones no consideradas

Limitación	Código
Costes de calidad no considerados	CCNC
Costes de mantenimiento no considerados	CMNC
Cuellos de botella no considerados	CBNC
Decisiones tácticas y operacionales	DTYO
Respuesta de los clientes no implementada	RCNI
Variación precio de productos reacondicionados	VPPR
Tiempo de computación no considerado	TCNC
Incertidumbre en la producción no considerada	IPNC
Incertidumbre en inventario considerada	IINC
Incertidumbre en la demanda y el suministro no consideradas	IDYS
Incertidumbre en la demanda y el suministro no consideradas al mismo tiempo	IDYS2
Incertidumbre en el transporte no considerada	ITNC
Incertidumbre en el precio o <i>lead-time</i> no consideradas	IPL
Incertidumbre en la capacidad o el coste no consideradas	ICC
Incertidumbre en la demanda acotada	IDA
Otras incertidumbres no consideradas	OINC

A continuación, en la Tabla 2.18 se muestra la relación de parámetros no considerados por los autores en los diferentes artículos.

Tabla 2.18. Parámetros no considerados

	CCNC	CMNC	CBNC	DTYO	RCNI	VPPR	TCNC	IPNC	IINC	IDYS	IDYS2	ITNC	IPL	ICC	IDA	OINC
Leung (2004)																
Leung (2007)																
Ng (2007)																
Xu (2007)																
Boni (2008)																
Yan (2008)																
Wang (2008)																
Jafari (2009)																
Li (2009)																
Xu (2009)																
Zuo (2009)																
Gharakhani (2010)																
Ng (2010)																
Ni Na (2010)											•					
Pishvae (2011)																•
Ben Tal (2011)														•		
Bredstrom (2011)																
Al-e-hashem (2011)																
Verderame (2011)															•	
Li (2011)																
Alem (2012)																
Kawas (2013)																
Mahmoudzadeh (2013)																•
Rahmani (2013)																
Aouam (2013)																
Carlsson (2013)																
Hatefi (2014)																•
Baud-Lavigne (2014)																
Ghaffari-Nasab (2014)																
Jabbarzadeh (2014)																
Mardaneh (2014)																
Tavakkoli (2014)																•
Tong (2014)																

	CCNC	CMNC	CBNC	DTYO	RCNI	VPPR	TCNC	IPNC	IINC	IDYS	IDYS2	ITNC	IPL	ICC	IDA	OINC
Zokae (2014)				•	•											
Rabbani (2015)													•			
Akbari (2015)										•						
Amaran (2015)																
Dubey (2015)																
Li (2015)																
Paul (2015)													•			
Pishawee (2015)																
Sakhaii (2015)	•	•	•							•						
Hasani (2016)																
Ardjmand (2016)								•	•	•						

De las desventajas recopiladas en los diferentes artículos, la simplicidad del modelo propuesto para reproducir entornos reales es la más común, mencionada por 7 autores (Ng & Fowler 2007; A. Ben-Tal et al. 2011; Xu et al. 2009; Mahmoudzadeh et al. 2013; Rahmani et al. 2014; Ghaffari-Nasab et al. 2014; Akbari & Karimi 2015). La segunda desventajas más común es el alto coste provocado por el enfoque robusto, observada en los trabajos de (J. Xu et al. 2007; Pishvae & Fazli Khalaf 2015; Tavakkoli-Moghaddam, Sakhaii & Vatani 2014; Tong et al. 2014; Leung et al. 2007).

Otras desventajas mencionadas en diversos trabajos son la aplicación de modelos en entornos no reales (Leung & Wu 2004; Mahmoudzadeh et al. 2013; Sakhaii et al. 2015) y el estudio de sólo un producto (Pishvae et al. 2011; Mahmoudzadeh et al. 2013; Hatefi & Jolai 2014).

Cabe destacar que los autores que más desventajas señalan en sus trabajos (Leung & Wu 2004; Mahmoudzadeh et al. 2013), indican hasta 4 desventajas en sus modelos, como se puede apreciar en la Tabla 2.18.

Sin embargo, la mayoría de autores no señalan las desventajas de los modelos propuestos (Amaran et al. 2015; Boni & Ben-Tal 2008; Wang et al. 2008; Li et al. 2009; Zuo et al. 2009; Gharakhani 2010; Ni-na & Bao-wen 2010; Li et al. 2011; Kawas et al. 2013; Aouam & Brahimi 2013; Jabbarzadeh et al. 2014; Mardaneh & Caccetta 2014; Dubey et al. 2015), lo cual no implica que dichos modelos no tengan limitaciones.

2.4 Discusión

Después de la revisión de los distintos artículos seleccionados para la elaboración de este trabajo, en esta sección se exponen algunos hechos relevantes y limitaciones de la bibliografía concerniente a la programación robusta.

En primer lugar, el objetivo principal de los trabajos revisados es la protección contra la incertidumbre. A lo largo del tiempo se puede observar una evolución de los artículos en los que ya no se busca sólo la robustez del modelo si no que se pretende que las soluciones presentadas no residan lejos de la solución óptima. Además, enfoques como el de Bertsimas & Sim (2004)

proponen enfoques de modelado de baja complejidad y fácil implementación, que además pueden resolverse mediante PLE. Es, por ello, que la contribución principal de los artículos revisados permite el ajuste de la robustez de los modelos frente al conservadurismo.

El coste asociado a la robustez, tratado en varios artículos, presenta la limitación principal de la programación robusta. Es, por ello, que muchos de los trabajos revisados se centran en problemas donde se prima la protección contra la incertidumbre frente al coste (aplicaciones en catástrofes humanitarias, procesos de alto coste productivo en caso de fallo en el servicio, etc.). Sin embargo, la evolución anteriormente comentada hacia modelos que permitan controlar el nivel de robustez hace que la programación robusta sea una opción cada vez más interesante frente a otras técnicas tradicionales en entornos donde la incertidumbre está presente.

Otro hecho reseñable es que la mayoría de los artículos utilizan algoritmos de *branch & bound* (en especial, en los solvers comerciales como CPLEX) para la resolución de los modelos planteados. Se puede observar una predisposición en los últimos años a emplear técnicas metaheurísticas para la resolución de los problemas. Este hecho es debido a la rapidez que presentan las técnicas metaheurísticas para la resolución de problemas, a pesar de no garantizar la solución óptima del problema. Los algoritmos genéticos o de nube de partículas son algunos ejemplos de técnicas metaheurísticas que se pueden encontrar en los artículos revisados.

Por último, cabe indicar que la revisión bibliográfica presenta algunas limitaciones. A pesar que la mayoría de los artículos han sido publicados en revistas relevantes de investigación y gestión de operaciones indexadas a través del motor de búsqueda *Web of Knowledge*, otros artículos de reciente publicación o procedentes de congresos pueden no haberse incluido.

2.5 Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado un análisis sobre los estudios que aplican la programación robusta a problemas de planificación de la producción. Para el análisis de los trabajos revisados se ha propuesto una clasificación basada en 9 aspectos: tipo de problema, enfoque de modelado, fuentes de incertidumbre, estructura de la función objetivo, enfoque de la solución, herramientas de desarrollo, aplicación, ventajas y limitaciones.

El estudio realizado de los diferentes trabajos ha permitido identificar las siguientes afirmaciones: (1) Los enfoques de modelado más empleados son el de Bertsimas (2004), Ben-Tal (1998) y Mulvey (1995), destacando la posibilidad del modelado de Bertsimas (2004) de transformar dicho modelado en un modelo lineal, cuya resolución es mucho menos compleja con respecto a modelos no lineales; (2) la fuente principal de incertidumbre considerada en los artículos revisados es la demanda; (3) la mayoría de los artículos revisados tienen una función objetivo centrada en la reducción de costes, pero también hay estudios que buscan la maximización de beneficios; (4) el enfoque de solución más empleado es la programación matemática (lineal y no lineal), empleando el resto de trabajos revisado técnicas metaheurísticas y o de simulación; (5) como herramienta de resolución, el algoritmo CPLEX es el elegido por la mayoría de los autores; (6) existe un mayor número de modelos aplicados a experimentos teóricos frente a modelos aplicados a casos reales; (7) la ventaja principal presente en todos los estudios revisados es la de robustez de los modelos planteados; y (8) de las desventajas recopiladas por los diferentes autores, la simplificación del modelo frente a la realidad es la más mencionada.

Por último, cabe indicar que la limitación principal de la programación robusta ha sido siempre el coste de la robustez. Sin embargo, los últimos estudios consiguen obtener modelos robustos sin alejarse de la solución óptima, permitiendo regular la robustez del modelo y reduciendo el nivel de conservadurismo de la solución.

2.6 Referencias

- Akbari, A.A. & Karimi, B., 2015. A new robust optimization approach for integrated multi-echelon, multi-product, multi-period supply chain network design under process uncertainty. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(1-4), pp.229–244.
- Amaran, S. et al., 2015. Medium-term maintenance turnaround planning under uncertainty for integrated chemical sites. *Computers & Chemical Engineering*, 84, pp.422–433.
- Aouam, T. & Brahim, N., 2013. Integrated production planning and order acceptance under uncertainty: A robust optimization approach. *European Journal of Operational Research*, 228(3), pp.504–515.
- Ardjmand, E. et al., 2016. A robust optimisation model for production planning and pricing under demand uncertainty. *International Journal of Production Research*, 54(13), pp.3885–3905.
- Baud-Lavigne, B., Bassetto, S. & Agard, B., 2014. A method for a robust optimization of joint product and supply chain design. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- Ben-Tal, a. & Nemirovski, a., 1998. Robust Convex Optimization. *Mathematics of Operations Research*, 23(4), pp.769–805.
- Ben-Tal, A. et al., 2011. Robust optimization for emergency logistics planning: Risk mitigation in humanitarian relief supply chains. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), pp.1177–1189.
- Ben-Tal, A., Golany, B. & Rozenblit, M., 2011. Robust optimization of a multi-period production planning problem under uncertainty. In *21st International Conference on Production Research: Innovation in Product and Production, ICPR 2011 - Conference Proceedings*. Fraunhofer-Verlag.
- Bertsimas, D. & Sim, M., 2004. The Price of robustness. *Operations Research*, 52(1), pp.35–53.
- Bertsimas, D. & Thiele, A., 2006. A Robust Optimization Approach to Inventory Theory. *Operations Research*, 54(1), pp.150–168.
- Bertsimas, D. & Thiele, A., 2004. A robust optimization approach to supply chain management. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 3064, pp.86–100.
- Boni, O. & Ben-Tal, A., 2008. Adjustable robust counterpart of conic quadratic problems. *Mathematical Methods of Operations Research*, 68(2), pp.211–233.
- Bredström, D., Flisberg, P. & Rönnqvist, M., 2011. A new method for robustness in rolling horizon planning. *International Journal of Production Economics*, 143, pp.41–52.
- Buschkühl, L. et al., 2010. *Dynamic capacitated lot-sizing problems: A classification and review of solution approaches*. *OR Spectrum* (Vol. 32).

- Carlsson, D., Flisberg, P. & Rönnqvist, M., 2014. Using robust optimization for distribution and inventory planning for a large pulp producer. *Computers & Operations Research*, 44, pp.214–225.
- Cuadrado, R.J., 2013. *Optimización robusta aplicada al manejo de inventario en la producción de vinos bajo condiciones de incertidumbre en los tiempos de fermentación*. Departamento de ciencias de la ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Cowdrick, R.M., 1995. Supply chain planning (SCP) — Concepts and case studies. *Computers & Industrial Engineering*, 29(1-4), pp.245–248.
- Díaz-Madroño, M., Mula, J. & Peidro, D., 2015. A review of discrete-time optimization models for tactical production planning. *International Journal of Production Research*, 52(17), pp.5171–5205.
- Dubey, R., Gunasekaran, A. & Childe, S.J., 2015. The design of a responsive sustainable supply chain network under uncertainty. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(1-4), pp.427–445.
- Ghaffari-Nasab, N., Ghazanfari, M. & Teimoury, E., 2014. Robust optimization approach to the design of hub-and-spoke networks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(5-8), pp.1091–1110.
- Gharakhani, M., 2010. A robust multi-objective production planning. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 1(1), pp.73–78.
- Hasani, A. & Khosrojerdi, A., 2016. Robust global supply chain network design under disruption and uncertainty considering resilience strategies: A parallel memetic algorithm for a real-life case study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 87, pp.20–52.
- Hatefi, S.M. & Jolai, F., 2014. Robust and reliable forward–reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9-10), pp.2630–2647.
- Hax, A.C., Meal, H.C., 1975. Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling. In: Geisler (Ed.), *Logistics: Studies in the Management Science*, vol. 1. Elsevier, North Holland.
- Hax, Arnaldo C & Candea, Dan 1984, *Production and inventory management*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Jabbarzadeh, A., Fahimnia, B. & Seuring, S., 2014. Dynamic supply chain network design for the supply of blood in disasters: A robust model with real world application. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 70(1), pp.225–244.
- Jafari-Eskandari, M. et al., 2009. A robust optimization approach for the milk run problem (an auto industry supply chain case study). In *2009 International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE 2009*. pp. 1076–1081.
- Jiawang, X. & Xiaoyuan, H., 2006. A Robust Optimization Model for Multi-objective Operation of Supply Chain Under Uncertain Market. In *2007 Chinese Control Conference*. IEEE, pp. 346–350.
- José Alem, D. & Morabito, R., 2012. Production planning in furniture settings via robust optimization. *Computers & Operations Research*, 39(2), pp.139–150.

- Kawas, B., Laumanns, M. & Pratsini, E., 2013. A robust optimization approach to enhancing reliability in production planning under non-compliance risks. *OR Spectrum*, 35(4), pp.835–865.
- Leung, S.C.H. et al., 2007. A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment. *European Journal of Operational Research*, 181(1), pp.224–238.
- Leung, S.C.H. & Wu, Y., 2004. A robust optimization model for stochastic aggregate production planning. *Production Planning and Control*, 15(5), pp.502–514.
- Li, J. et al., 2009. Robust Optimization on Across-Chain Inventory Control of Cluster Supply Chains. In *2009 International Conference on Computational Science and Engineering*. IEEE, pp. 265–270.
- Li, X. & Marlin, T.E., 2009. Robust supply chain performance via Model Predictive Control. *Computers & Chemical Engineering*, 33(12), pp.2134–2143.
- Li, Z., Ding, R. & Floudas, C.A., 2011. A Comparative Theoretical and Computational Study on Robust Counterpart Optimization: I. Robust Linear Optimization and Robust Mixed Integer Linear Optimization. *Industrial & engineering chemistry research*, 50(18), pp.10567–10603.
- Li, Z. & Li, Z., 2015. Optimal robust optimization approximation for chance constrained optimization problem. *Computers & Chemical Engineering*, 74, pp.89–99.
- Liu, C.L., Sun, L.F. & Li, J.Z., 2009. Cross-chain inventory coordination of multi-echelon cluster supply chains and robust optimization algorithm. *Kongzhi Lilun Yu Yingyong/Control Theory and Applications*, 26(9), pp.1046–1050.
- Mahmoudzadeh, M., Sadjadi, S.J. & Mansour, S., 2013. Robust optimal dynamic production/pricing policies in a closed-loop system. *Applied Mathematical Modelling*, 37(16-17), pp.8141–8161.
- Mardaneh, E. & Caccetta, L., 2014. Impact of price-adjustments costs on integration of pricing and production planning of multiple-products. *Optimization Letters*, 9(1), pp.119–142.
- Mardones, J.A. 2007. *Optimización robusta: análisis y comparación de métodos aplicados a problemas de camino más cortos*. Escuela de ingeniería civil industrial. Universidad de Talca.
- Masud, A.S.M. & Hwang, C.L., 1980. An aggregate production planning model and application of three multiple objective decision methods. *International Journal of Production Research*, 18(6), p.741.
- Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J., Malekly, H. & Aryanezhad, M.B., 2011. A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 134(1), pp.28–42.
- Mula, J., Poler, R. & Garcia, J.P., 2006. *MRP with flexible constraints: A fuzzy mathematical programming approach*. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(1), pp.74–97.
- Mulvey, J.M. et al., 1995. Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research*, 43(2), pp.264–281.
- Ng, T.S. & Fowler, J., 2007. Semiconductor production planning using robust optimization. In *2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. IEEE, pp. 1073–1077.
- Ng, T.S., Sun, Y. & Fowler, J., 2010. Semiconductor lot allocation using robust optimization. *European Journal of Operational Research*, 205(3), pp.557–570.

- Ni-na, Y. & Bao-wen, S., 2010. Robust optimization of multi-sourcing strategies in resilient supply chain. In *2010 International Conference on Management Science & Engineering 17th Annual Conference Proceedings*. IEEE, pp. 477–481.
- Paul, J.A. & Wang, X. (Jocelyn), 2015. Robust optimization for United States Department of Agriculture food aid bid allocations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 82, pp.129–146.
- Peidro, D. & Vasant, P., 2009. Fuzzy Multi-Objective Transportation Planning with Modified SCurve Membership Function. In *Proceedings on Power Control and Optimization 2009* pp. 101-110.
- Pishvae, M.S. & Fazli Khalaf, M., 2015. Novel robust fuzzy mathematical programming methods. *Applied Mathematical Modelling*.
- Pishvae, M.S., Rabbani, M. & Torabi, S.A., 2011. A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2), pp.637–649.
- Rabbani, M., Manavizadeh, N. & Hosseini Aghozi, N.S., 2015. Robust optimization approach to production system with failure in rework and breakdown under uncertainty: evolutionary methods D. Maurizio Faccio, Dr. Yuval Cohen, ed. *Assembly Automation*, 35(1), pp.81–93.
- Rahmani, D. et al., 2013. A robust optimization model for multi-product two-stage capacitated production planning under uncertainty. *Applied Mathematical Modelling*, 37(20-21), pp.8957–8971.
- Rahmani, D., Yousefli, A. & Ramezani, R., 2014. A new robust fuzzy approach for aggregate production planning. *Scientia Iranica*, 21(6), pp.2307–2314.
- Sakhaii, M. et al., 2015. A robust optimization approach for an integrated dynamic cellular manufacturing system and production planning with unreliable machines. *Applied Mathematical Modelling*.
- Soyster, A. L. 1973. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, 21 pp. 1154–1157.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Sakhaii, M., Vatani, B., et al., 2014. A Robust Model for a Dynamic Cellular Manufacturing System with Production Planning. *International Journal of Engineering*, 27(4 (A)), pp.587–598.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Sakhaii, M. & Vatani, B., 2014. A Robust Model for a Dynamic Cellular Manufacturing System with Production Planning. *International Journal of Engineering*, 27(4 (A)), pp.587–598.
- Tong, K., You, F. & Rong, G., 2014. Robust design and operations of hydrocarbon biofuel supply chain integrating with existing petroleum refineries considering unit cost objective. *Computers & Chemical Engineering*, 68, pp.128–139.
- Verderame, P.M. & Floudas, C.A., 2011. Multisite Planning under Demand and Transportation Time Uncertainty: Robust Optimization and Conditional Value-at-Risk Frameworks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(9), pp.4959–4982.
- Wang, J., Zhao, D. & Tian, L., 2008. A Simulation-Based Robust Optimization Model for Supply Chain Network Design. In *2008 Fourth International Conference on Natural Computation*. IEEE, pp. 515–519.

- Xu, J. et al., 2009. Robust Operation Strategy Design for an Electronic Market Enabled Supply Chain with Uncertain Variable Costs. In *2009 International Conference on Management of e-Commerce and e-Government*. IEEE, pp. 359–362.
- Xu, J., Huang, X. & Yan, N., 2007. A multi-objective robust operation model for electronic market enabled supply Chain with uncertain demands. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 16(1), pp.74–87.
- Xu, J.W., Huang, X.Y. & Yan, N., 2007. A multi-objective robust operation model for electronic market enabled supply chain with uncertain demands. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 16(1), pp.74–87.
- Yan, N.N., Ma, L.L. & Liu, B., 2008. Research on robust stochastic optimization of multi-retailer competition under demand uncertainty. In *2008 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. IEEE, pp. 1699–1704.
- Zhao, H., Li, Y. & Kang, Z., 2013. Robust optimization in oil reservoir production. *Shiyou Xuebao/Acta Petrolei Sinica*, 34(5), pp.947–953.
- Zokaee, S. et al., 2014. Robust supply chain network design: an optimization model with real world application. *Annals of Operations Research*.
- Zuo, X., Mo, H. & Wu, J., 2009. A robust scheduling method based on a multi-objective immune algorithm. *Information Sciences*, 179(19), pp.3359–3369.

3 Descripción de la planificación de la producción de una empresa del sector del automóvil

3.1 Introducción

En este apartado se describe la planificación de la producción y los procesos operativos fundamentales requeridos para la fabricación de componentes decorativos exteriores para automóviles de la empresa objeto de estudio.

3.2 Descripción del proceso productivo

La empresa realiza el acabado superficial decorativo de las piezas inyectadas suministradas por varios proveedores. Es un proceso capacitivo y se dispone de un único recurso. Este recurso, en función de las horas de producción programadas, permite realizar un número de acabados determinados, que dependen del número de barras donde se introducen las piezas para su procesado. Cada barra realiza el siguiente proceso cíclico:

1. Se introducen las piezas de inyección a las que se quiere realizar el acabado superficial.
2. Se realiza el proceso dentro del recurso (máquina).
3. Las piezas salen de la máquina con el tratamiento realizado, son descolgadas y verificadas.
4. Se procede al embalaje de las piezas que superan los controles de calidad (las piezas NOK son clasificadas como SCRAP en contenedores para su posterior eliminación).
5. En este último paso se elige entre introducir la barra con la misma referencia o cambiar de referencia.

Hay que tener en cuenta que, al ser un proceso capacitivo y cíclico, la máquina no debe pararse en ningún momento durante el proceso productivo, por lo que las barras deben introducirse periódicamente, realizando cada barra un determinado número de vueltas en el circuito productivo durante el tiempo que dura la producción (entre el arranque y el paro de la instalación).

Además, el proceso productivo puede volverse inestable, alargando los tiempos productivos para determinadas referencias. En concreto, hasta 5 referencias de un determinado tipo de acabado suelen presentar aumentos de hasta el 10% en su tiempo de fabricación. Esto es debido a la complejidad del proceso de dichos acabados y a su implantación reciente, lo que origina frecuentes averías y paros de máquina. Por el contrario, el resto de referencias, aunque también puede sufrir aumentos en su tiempo de fabricación, no suelen presentar dichos problemas.

A continuación, se describen los elementos principales del proceso:

- Materia prima: piezas de inyección suministradas por proveedores.
- Máquina: existe un único recurso en donde las piezas son procesadas. El proceso es capacitivo, de manera que durante el ciclo de funcionamiento, dicha máquina permite realizar un número determinado de acabados.

- Barras: Es el elemento donde se introducen las piezas en la máquina para su procesado. Según las horas de producción programadas, hay un número de barras que pueden introducirse, por lo que la capacidad producción total puede expresarse en función del número de barras.

Además, en cada barra pueden incluirse un determinado número de piezas de una referencia (siempre piezas de una misma referencia). El número de piezas de una referencia que pueden ir en una barra determina el tamaño de los lotes de producción. Los lotes son fijos, no pudiendo fabricarse más piezas (o menos) de la cantidad determinada por cada barra para cada referencia. El tamaño del lote productivo de cada referencia viene determinado, fundamentalmente, por el tamaño de la misma, ya que las barras tienen unas dimensiones definidas.

3.3 Descripción del proceso logístico

En este apartado se describe el flujo de materiales determinado por el proceso productivo. En primer lugar, se pueden considerar los siguientes tipos de materiales:

- Materia prima: es el conjunto de materias primas de los cuales se aprovisiona la empresa para la producción las piezas decorativas exteriores (producto terminado). En general, se pueden distinguir dos familias principales:
 - Piezas inyectadas: son los componentes exteriores de automóviles, a falta del acabado superficial aplicado durante el proceso productivo.
 - Productos químicos: necesarios en el proceso de fabricación y cuyas cantidades están determinadas por las horas de fabricación de la máquina.
- *WIP (work in process)*: son las piezas inyectadas que están siendo procesadas dentro de la máquina. Se considera *WIP* a toda la pieza inyectada desde que entra en la máquina para la aplicación del acabado superficial hasta la finalización del proceso y su verificado de calidad posterior.
- Producto terminado: Es la pieza inyectada como el acabado superficial aplicado, una vez que se ha realizado sobre la pieza la inspección de calidad correspondiente.

Una vez se obtiene el producto terminado, se realiza el proceso de embalado. Cada referencia tiene definido un tipo concreto de embalaje por parte del fabricante de automóviles. Cuando se finaliza el proceso de embalado, el producto se ubica en la zona de producto terminado del almacén, a la espera de su expedición.

Existen tres transportes diarios entre la empresa y el cliente principal, que a su vez es el proveedor de las piezas de inyección. Por lo tanto, en cada transporte se realizan dos operaciones:

- Descarga de materia prima.
- Carga de producto terminado.

3.4 Planificación de la producción actual

La planificación de la producción se hace en base a las demandas de los diferentes clientes. A partir del plan estratégico de la empresa (anual) se elaboran los planes de producción mensuales, que determinan la asignación del número de horas productivas disponibles.

Cada semana se actualizan las demandas a corto y medio plazo, con el objetivo de lanzar un PMP semanal. La información recibida por parte de los diferentes clientes incluye:

- Pedidos en firme diarios para las próximas 2 semanas.
- Previsión de pedidos semanales para las siguientes 12 semanas.
- Previsión de la demanda en un horizonte anual.

La herramienta empleada para el lanzamiento de estos planes es Microsoft Excel. Las entradas principales del PMP son:

- Demandas de clientes a corto/medio plazo (incluyendo cargas previstas de camiones por día).
- Horas productivas disponibles.
- Capacidad de producción de cada referencia (lotes).
- Stocks de materia prima en la instalación.
- Stocks de materia prima del proveedor.

En la Figura 3.1 se muestra en un diagrama de flujo el procedimiento en el que se basa la planificación de la producción.

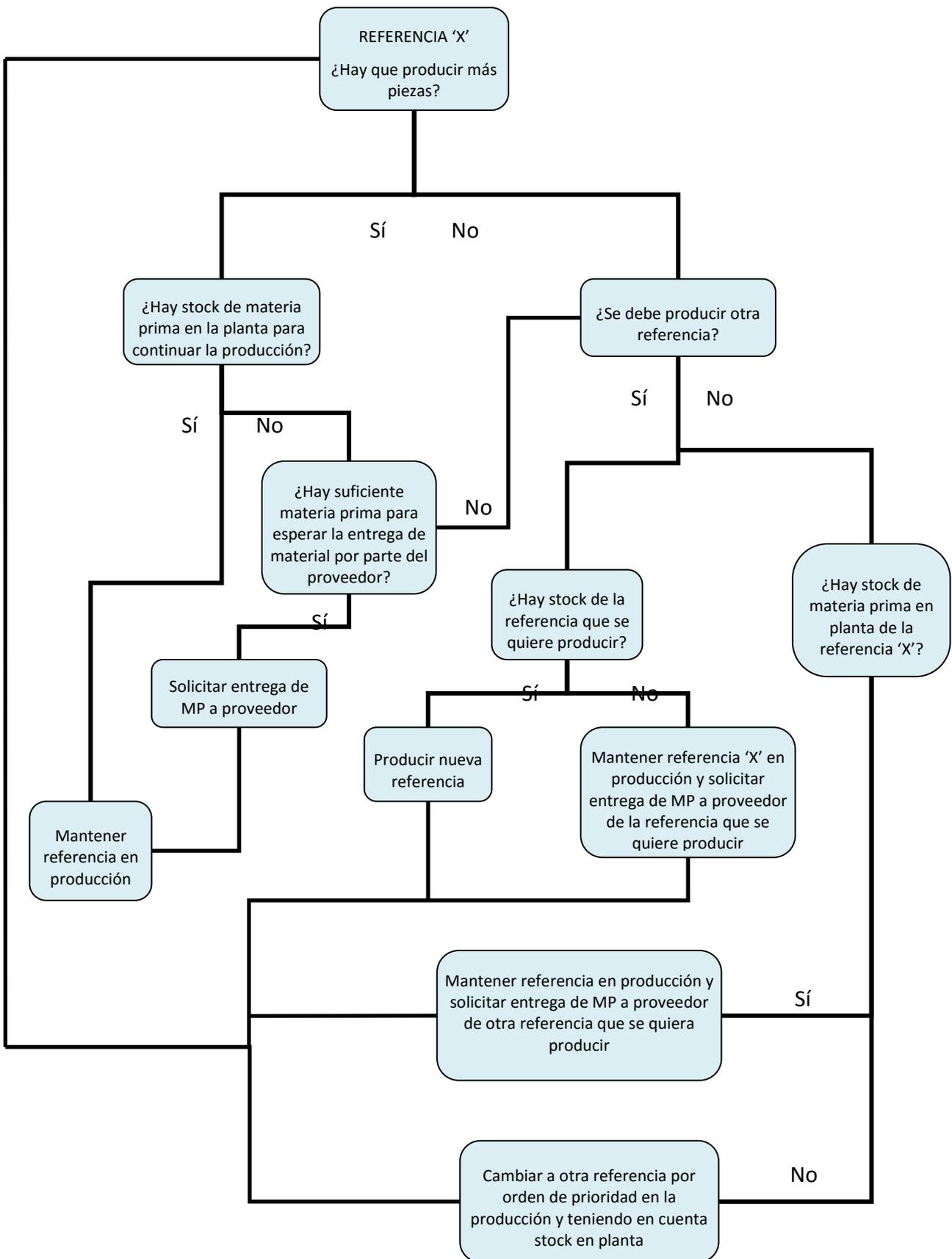


Figura 3.1 Diagrama de flujo del procedimiento de planificación de la producción actual

3.5 Procedimiento heurístico

La planificación de la producción actual se realiza mediante el apoyo de una hoja de cálculo, empleando la técnica heurística que se describe en este apartado.

En la hoja de cálculo empleada para la planificación se detallan las referencias que están en producción y el consumo de piezas inyectadas (materia prima) diario asociado a cada referencia. Además, se incluye el inventario disponible de cada referencia tanto en las instalaciones propias como en las del proveedor. Con dicha información es posible el cálculo de las cantidades de piezas inyectadas necesarias a solicitar en cada camión, con una ocupación máxima de 52 pallets europeos en cada transporte.

La estructura de la hoja de cálculo empleada para la planificación de la producción se muestra en la Figura 3.2 y el cálculo de las necesidades de piezas inyectadas a solicitar se muestra en la Figura 3.3 y se describe en los siguientes apartados.

3.5.1 Planificación de la Producción

En primer lugar, se definen los componentes de la hoja de cálculo empleada en la planificación de la producción actual (ver Figura 3.2):

Columna Referencia

Se corresponde con el identificador único de una pieza incluida en el conjunto de piezas que se producen en la instalación.

Columna P/C

Indica el número de piezas por barra (tamaño de lote) que se introducen en el recurso para el proceso de acabado superficial.

Nº de barras

Muestra el número barras de una determinada referencia que se van a introducir en el proceso en cada vuelta de producción.

Balance

Es la diferencia entre las piezas necesarias para un día de producción y el stock actual en la planta.

Stock Proveedor

Es la cantidad de piezas de la referencia que actualmente se encuentran en las instalaciones del proveedor disponibles para su solicitud.

Stock Almacén

Es la cantidad de piezas de la referencia que actualmente se encuentran en las instalaciones de la planta, disponibles para la producción.

Producción (PCS)

Indica el número de piezas que se consumirán durante un día de producción, para cada referencia.

Nueva referencia

En esta columna se indica la referencia que se producirá sustituyendo a la referencia actualmente en producción.

Referencia	P/C	Nº Barras	Balance	Stock Proveedor	Stock Almacén	Producción(PCS)	Nueva Referencia
Item 1	100	1	290	3925	840	550	
Item 2	64	3	429	8851	1485	1056	
Item 3	72	4	436	0	2020	1584	
Item 4	72	4	1856	2153	3440	1584	
Item 5	140	1	-742	0	28	770	Item 36
Item 6	60	5	89	0	1739	1650	
Item 7	60	5	115	0	1765	1650	
Item 8	430	1	-1057	0	1308	2365	Item 22
Item 9	72	2	996	0	1788	792	
Item 10	144	1	432	0	1224	792	
Item 11	104	1	1312	413	1884	572	
Item 12	48	1	4895	0	5159	264	

•
•
•

Item 77	40	3	258	1086	918	660	
Item 78	12	1	18	0	84	66	
Item 79	80	1	44	1294	484	440	
Item 80	12	5	873	243	1203	330	
Item 81	24	1	48	350	180	132	Item 12
Item 82	72	1	407	672	803	396	
Item 83	36	1	230	681	428	198	
Item 84	20	2	63	360	283	220	

Figura 3.1. Estructura de la hoja de cálculo empleada para la planificación de la producción

La heurística en la que se basa el proceso actual de planificación es la siguiente:

Partiendo de las referencias que hay en producción en la máquina (que pueden tener una o más barras) se observa el material de inyección disponible para cada una de ellas en las columnas de Stock. Pueden darse 2 posibilidades:

1. Hay suficiente stock en planta de materia prima para mantener la referencia en producción, es decir, la barra puede seguir dando vueltas dentro del ciclo productivo. En este caso, hay 2 nuevas opciones:
 - a. Sí interesa seguir produciendo la referencia: esto implicaría mantener la referencia en producción.
 - b. No interesa seguir produciendo la referencia, ya que las demandas están cubiertas: se debe realizar un cambio de referencia e introducir una nueva referencia en la posición de dicha barra en la secuencia productiva.
2. No hay suficiente stock en planta de materia prima para mantener la referencia en producción. Para esta caso, hay 2 posibilidades:
 - a. Sí interesa seguir produciendo la referencia: se vuelve a tener 2 opciones:
 - i. El proveedor tiene stock y puede suministrarlo a tiempo para no producir una ruptura de stock de materia prima: esto implicaría mantener la referencia en producción y solicitar inyección al proveedor en el siguiente transporte.
 - ii. El proveedor no tiene stock o no puede suministrarlo a tiempo, impidiendo continuar con la producción de dicha referencia: es necesario realizar un cambio de referencia para dicha barra en la secuencia de producción.
 - b. No interesa seguir produciendo la referencia, ya que las demandas están cubiertas: se debe realizar un cambio de referencia e introducir una nueva referencia en la posición de dicha barra en la secuencia productiva.

3.5.2 Cálculo de la materia prima a solicitar al proveedor

En la Figura 3.3, se muestra un ejemplo de la hoja de cálculo empleada para la solicitud, de piezas al proveedor. La estructura de esta hoja es la siguiente:

Columna Referencia

Corresponde con el identificador único de una pieza incluida en el conjunto de piezas que se producen en la instalación

Stock Proveedor

Es la cantidad de piezas de la referencia que actualmente se encuentran en las instalaciones del proveedor disponibles para su solicitud.

Stock Almacén

Es la cantidad de piezas de la referencia que actualmente se encuentran en las instalaciones de la planta, disponibles para la producción.

Consumo

Indica el número de piezas que se consumirán durante un día de producción, para cada referencia.

Necesidad

Muestra el número de piezas necesarias de cada referencia para no parar su producción diaria.

Pallets

De entrada manual, permite introducir el número de pallets que se solicitarán de cada referencia. El número en la parte superior de la columna indica el número de pallets solicitados, siendo 52 pallets en número máximo a solicitar por camión.

PCS

Corresponde al número de piezas correspondientes al número de pallets solicitados en la columna pallets.

Ref	Stock Proveedor	Stock Almacén	Consumo	Necesidad	Pallets	PCS
Ref. 1	40	0	0	0		0
Ref. 2	0	29	0	-29		0
Ref. 3	0	154	0	-154		0
Ref. 4	0	0	0	0		0
Ref. 5	132	0	0	0		0
Ref. 6	0	0	0	0		0
Ref. 7	0	190	0	-190		0
Ref. 8	0	0	0	0		0
Ref. 9	0	0	0	0		0
Ref. 10	0	569	0	-569		0
Ref. 11	0	171	0	-171		0
Ref. 12	0	0	0	0		0
Ref. 13	1195	0	0	0		0
Ref. 14	2700	475	693	218	2	400
Ref. 15	1380	1206	693	-513		0
Ref. 16	2314	730	990	260	2	800
Ref. 17	1126	2453	0	-2453		0
Ref. 18	0	684	0	-684		0
Ref. 19	0	2100	0	-2100		0
Ref. 20	0	736	0	-736		0
Ref. 21	0	736	0	-736		0
Ref. 22	0	0	0	0		0
Ref. 23	0	0	0	0		0
Ref. 24	0	0	0	0		0

Figura 3.2. Estructura de la hoja de cálculo empleada para la solicitud de piezas inyectadas al proveedor

El proceso del cálculo del aprovisionamiento de materia prima se describe a continuación:

En primer lugar, la hoja de cálculo está diseñada para calcular automáticamente el consumo de cada referencia para el periodo productivo asignado (normalmente, un día de producción) y las necesidades de cada una de las referencias. Estas necesidades son la diferencia entre el consumo durante el proceso productivo de cada referencia y el stock disponible en planta para dicha referencia. En caso de que la diferencia sea negativa, es decir, el stock en planta de materia prima sea mayor que el consumo (durante un periodo productivo determinado), la columna de necesidades reflejará un valor negativo. En caso contrario, siendo el consumo de inyección mayor que el stock en planta, la columna de necesidades mostrará el número de piezas mínimo para mantener la referencia en producción, indicando dicho valor en color rojo de manera automática.

Una vez realizado el cálculo automático de las necesidades de cada referencia se procederá a introducir manualmente un número entero de pallets para cada referencia en la columna Pallets, que serán solicitados al proveedor en el siguiente transporte.

Cabe destacar que para facilitar el cálculo de pallets, en la columna PCS (pieces - piezas) automáticamente se calcula el número de piezas de la referencia asociadas al número de pallets introducido.

Cabe destacar que la hoja calcula automáticamente la suma de pallets, con el objetivo de no sobrepasar los 52 pallets que puede cargar cada transporte como máximo.

3.6 Conclusiones

El caso objeto de estudio del presente trabajo corresponde a una empresa que pertenece al sector del automóvil, siendo proveedora de primer (para determinadas referencias para algunos fabricantes de automóvil) y de segundo nivel de un ensamblador/fabricante internacional. La planificación de la producción se realiza en base a las demandas de los clientes y al stock de materia prima disponible (tanto en planta como en las instalaciones del proveedor).

Además, esta planificación dependerá de varias restricciones, como la capacidad de producción de las referencias (determinada en base a los lotes de producción de cada referencia) y la limitación de disponer de un único recurso de carácter capacitivo.

En función de la información proporcionada por los clientes en las demandas, los niveles de stock disponibles y el tamaño de los lotes productivos de cada referencia, se determina mediante una hoja de cálculo el plan de producción y las cantidades de materia prima necesarias a solicitar a los proveedores, teniendo en cuenta la frecuencia de los transportes y su carga máxima.

4 Planteamiento analítico del problema para la planificación de la producción en una empresa del sector del automóvil

En este apartado se desarrolla el modelo de programación matemática para la optimización de la planificación de la producción. En primer, lugar se plantea el modelo determinista, que no considera incertidumbre en el proceso, para después proponer otros dos modelos basados en enfoques robustos, con el objetivo de conseguir protección frente a la incertidumbre en el proceso descrito en el problema planteado en el apartado anterior, minimizando los costes del proceso productivo descrito.

4.1 Descripción del problema

El modelo se propone para la planificación de la producción en un entorno de fabricación multi-producto, multi-periodo y con restricciones de capacidad.

Según Mula (2004) y Díaz-Madroñero (2015), un entorno multi-producto es aquel en el que se producen más de un producto, que pueden ser tanto productos finales como materias primas y submontajes requeridos para la producción de los productos finales. El horizonte de planificación se considera un conjunto de periodos de tiempo (consecutivos y enteros) de igual longitud. La restricción de capacidad viene dada por la cantidad de piezas que pueden fabricarse en función del número de horas del recurso disponible.

El *stock* de un producto se define como el número de piezas disponibles de una referencia determinada al final de un periodo dado.

A continuación, se define el problema que se pretende modelar:

DADOS

1. Conjunto de datos de productos (número de productos, tiempo de fabricación, porcentaje de *scrap*, tamaño de lote de pedido, etc.)
2. Capacidad disponible del recurso.
3. Inventario inicial.
4. Demanda a lo largo del horizonte de planificación.

DETERMINAR

1. Cantidad a producir de cada producto en cada periodo del horizonte de planificación.
2. Inventario (stock) de cada producto en cada periodo.
3. Retraso en la demanda de cada producto al final de cada periodo.
4. Utilización del recurso productivo, incluyendo horas extra y ociosas.

OBJETIVOS

1. Minimizar los costes asociados a la producción (incluyendo los costes por horas extra y ociosa) optimizando los recursos disponibles.
2. Minimizar los costes de inventario para satisfacer la demanda del cliente sin incurrir en fallos de servicio al final de cada periodo a lo largo del horizonte de planificación.

CONSIDERACIONES

1. La demanda es firme a lo largo de todo el horizonte de planificación, lo cual es asumible al ser las demandas a corto plazo en el sector de la automoción no suelen presentar variación.
2. La incertidumbre está presente en el proceso, ya que puede presentar inestabilidad, afectando al tiempo de fabricación de las piezas, principalmente a 5 productos de un determinado acabado superficial, que pueden ver aumentado su tiempo de fabricación hasta un 10%.
3. No se considera incertidumbre en el suministro de materias primas.

4.2 Restricciones

El modelo propuesto presenta las siguientes restricciones:

1. Ecuación de balance de inventario.
2. Limitación de capacidad del recurso productivo disponible.
3. Cada producto tiene asociado un determinado tamaño de lote productivo.
4. La demanda debe quedar cubierta en el último periodo del horizonte de planificación.

4.3 Datos del problema

Las entradas del modelo, cuyos parámetros están incluidos en la base de datos del modelo, se enumeran a continuación:

1. Demandas de cada producto en cada periodo.
2. Inventario y retraso en la demanda iniciales.
3. Características de los productos:
 - a. Tiempo de fabricación.
 - b. Rendimiento de cada producto.
 - c. Tamaño de lote.
 - d. Costes unitarios de fabricación, posesión y retraso en la demanda para cada producto.
 - e. Costes de hora extra y hora ociosa.
 - f. Capacidad máxima del recurso productivo.

4.4 Formulación del modelo determinista adaptado de Mula (2004)

El modelo determinista adoptado como base de este trabajo se plantea originalmente en Mula (2004). Concretamente, esta versión adaptada del modelo de Mula (2004) no contempla la lista de materiales y considera el rendimiento productivo como un porcentaje de la producción de productos terminados.

4.4.1 Elementos

Índices y conjuntos

I : Conjunto de productos ($i=1, 2, \dots, I$)

T : Conjunto de periodos de tiempo en el horizonte de planificación ($t=1, 2, \dots, T$).

R : Recurso productivo.

4.4.2 Datos

D_{it} : Demanda del producto i en el periodo t .

$INVTO_i$: Inventario inicial del producto i .

K_i : Número de unidades que componen el lote de fabricación del producto i .

TF_i : Tiempo de fabricación de cada unidad de producto i .

AR_i : Tiempo requerido del recurso por cada producto i en el periodo t .

β_i : Rendimiento del producto i .

lot_i : Tamaño de lote de producción del producto i

CAP_r : Capacidad disponible del recurso productivo en cada periodo.

RdO_i : Retraso de la demanda del producto i en cada periodo t .

Cp_i : Costes variables de producción de una unidad del producto i .

Ct_i : Costes de inventario de una unidad del producto i .

Crd_i : Coste de retraso de la demanda de una unidad del producto i .

$Ctoc_r$: Costes del tiempo ocioso del recurso r en el periodo t .

$Ctext_r$: Costes del tiempo extra del recurso r en el periodo t .

4.4.3 Variables de decisión

P_{it} : Cantidad a fabricar del producto i en el periodo t .

$INVT_{it}$: Inventario del producto i al final del periodo t .

K_{it} : Número de lotes a producir del producto i en el periodo t .

Rd_{it} : Nivel de retraso de la demanda del producto i al final de periodo t .

Toc_{rt} : Tiempo ocioso del recurso r durante el periodo t .

Tex_{rt} : Tiempo extra del recurso r durante el periodo t .

Donde P_{it} , $INVT_{it}$, K_{it} y Tex_{rt} se definen como variables enteras para el caso objeto de estudio.

4.4.4 Función objetivo

La función objetivo del modelo propuesto tiene como objetivo la minimización de costes:

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (cp_i P_{it} + ci_i INVT_{it} + crd_i Rd_{it}) + \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T (ctoc_r Toc_{rt} + ctex_r Tex_{rt}) \quad (4.1)$$

Donde el coste de retraso en la demanda incluye los costes de insatisfacción del cliente, la reducción de ingresos, la pérdida de la confianza en la relación cliente-proveedor y los costes de transportes especiales asociados al incumplimiento en el servicio. Además, hay que tener en cuenta que en el caso objeto de estudio existe un único recurso productivo.

4.4.5 Restricciones

$$INVT_{i,t-1} + P_{it} + RP_{it} - INVT_{i,t} - Rd_{i,t-1} + Rd_{it} = d_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (4.2)$$

$$\sum_{i=1}^I AR_{ir} P_{it} + Toc_{rt} - Tex_{rt} = CAP_{rt} \quad \forall r, \forall t \quad (4.3)$$

$$P_{it} = k \cdot lot_i \quad \forall i, \forall t \quad (4.4)$$

$$Rd_{it} = 0 \quad \forall i, \forall t = T \quad (4.5)$$

$$P_{i,t}, k, INVT_{i,t}, Rd_{i,t}, Toc_{rt}, Tex_{rt} \geq 0 \quad \forall i, \forall t, \forall r \quad (4.6)$$

La primera expresión corresponde a la restricción del balance de inventario, en la que el inventario inicial ($INVT_{i,t-1}$) más la producción actual (P_{it}), más las relaciones programadas (RP_{it}), más el retraso en la demanda (Rd_{it}) en el periodo, menos el inventario final, menos el retraso en la demanda del periodo anterior, menos la demanda no satisfecha en el periodo ($Rd_{i,t-1}$) es igual a la demanda, para cada producto en cada periodo a lo largo del horizonte de planificación.

La segunda ecuación es la restricción asociada a la capacidad de producción en cada periodo para los recursos productivos. La suma de las horas productivas ($\sum_{i=1}^I AR_{ir} P_{it}$) y ociosas (Toc_{rt}) menos las horas extra (Tex_{rt}) es igual a la capacidad existente por parte de los recursos en cada periodo (CAP_{rt}).

La restricción de la ecuación (4.4) determina que la producción de un determinado producto i en un periodo t sea múltiplo del tamaño de lote definido para cada producto, debido a las características técnicas del proceso productivo, que no permite la fabricación de piezas en otras cantidades.

Por último, se añade la restricción (4.5) que obliga que la demanda total al final del último periodo debe quedar cubierta, no existiendo retraso en la demanda en el último periodo, además de las restricciones de no negatividad (4.6) para las variables de decisión.

4.5 Formulación del modelo robusto con el enfoque de Soyster (1973)

Según el enfoque robusto propuesto por Soyster (1973), descrito en el apartado 2.3 del presente trabajo, para la aplicación de dicho enfoque robusto en el modelo anterior se realizan las siguientes modificaciones en la restricción de la capacidad de producción:

$$\sum_{i=1}^I AR_{ir}P_{it} + \sum_{i=1}^I ARv_{ir}Py_{it} + Toc_{rt} - Tex_{rt} = CAP_{rt} \quad \forall r, \forall t \quad (4.7)$$

Siendo ARv_{ir} la máxima variación del tiempo requerido por el recurso para cada producto y P_y la variable auxiliar entera implementada por Soyster (1973) en la propuesta de su modelo.

Por último, se añade la restricción de no negatividad a las nuevas variables definidas.

Implementando dichas restricciones en el modelo determinista se obtiene el modelo robusto con el enfoque de Soyster (1973), con protección contra la incertidumbre en el proceso planteado. Como se pudo comprobar, se trata de la aplicación del modelo determinista para el caso más desfavorable.

4.6 Formulación del modelo robusto con el enfoque de Bertsimas y Sim (2004)

Según el enfoque propuesto por Bertsimas & Sim (2004), descrito en el apartado 2.3 del presente trabajo, para la aplicación de dicho enfoque robusto en el modelo anterior se realizan las siguientes modificaciones en la restricción de la capacidad de producción:

$$\sum_{i=1}^I AR_{ir}P_{it} + Toc_{rt} - Tex_{rt} + Z_{rt}\omega_{rt} + \sum_{i=1}^I Pb_{irt} = CAP_{rt} \quad \forall r, \forall t \quad (4.8)$$

Siendo Z_{rt} y Pb_{irt} las variables auxiliares enteras implementadas por Bertsimas & Sim (2004) en la propuesta de su modelo. Además, se añade el parámetro de control ω_{rt} , que permite regular la robustez del modelo. Este parámetro determina el número de productos cuyo tiempo de proceso se verá afectado por la incertidumbre.

Por otro lado, se añaden las siguientes restricciones:

$$Z_{r,t} + Pb_{r,i,t} \geq ARv_i \cdot Py_{i,t} \quad \forall i, \forall r, \forall t \quad (4.9)$$

Añadiendo además las restricciones de no negatividad a las nuevas variables introducidas en las expresiones anteriores:

$$Z_{r,t} \geq 0 \quad \forall r, \forall t \quad (4.10)$$

$$Pb_{r,i,t} \geq 0 \quad \forall i, \forall r, \forall t \quad (4.11)$$

Tras implementar dichas restricciones en el modelo determinista se obtiene el modelo robusto con el enfoque de Bertsimas & Sim (2004), con protección contra la incertidumbre en el proceso regulada con el parámetro ω_{rt} , es decir, se puede elegir el grado de protección contra la incertidumbre seleccionando el número de productos que pueden variar el tiempo de su proceso. Esto supone una ventaja sobre el modelo de Soyster (1973) al no ser tan conservador, ya que no es probable que todas las referencias presenten variaciones en el tiempo de proceso de fabricación a la vez, permitiendo que el modelo sea más flexible y reduciendo el coste de la robustez.

4.7 Conclusiones

En este capítulo se han desarrollado 3 modelos de programación matemática para la resolución del problema de planificación de la producción planteado en el capítulo 3, basado en una empresa del sector de la automoción.

En primer lugar, se han definido los conceptos básicos del problema objeto de estudio y se han descrito los objetivos que se pretenden conseguir en base a distintas consideraciones y teniendo en cuenta las restricciones asociadas a dicho problema.

A continuación se ha formulado el modelo determinista de Mula (2004) adoptado como base de este trabajo, definiendo los elementos que componen el modelo (parámetros, variables de decisión y auxiliares), la función objetivo y las restricciones que presenta dicho modelo.

A partir del modelo determinista se han formulado los modelos robustos de Soyster (1973) y Bertsimas & Sim (2004), modificando la restricción de capacidad y añadiendo nuevas variables y restricciones para hacer frente a la incertidumbre del proceso, concretamente, del tiempo requerido de fabricación.

Estos modelos serán implementados y analizados en el siguiente capítulo.

4.8 Referencias

Bertsimas, D. & Sim, M., 2004. The Price of robustness. *Operations Research*, 52(1), pp.35–53.

Mula, J., 2004. *Modelos para la Planificación de la Producción bajo Incertidumbre. Aplicación a una Empresa del Sector del Automóvil*. Departamento de Organización de Empresas, Universidad Politécnica de Valencia.

Soyster, A. L. 1973. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, 21 pp. 1154–1157.

5 Aplicación en la planificación de la producción de una empresa del sector del automóvil

En el presente trabajo fin de máster se ha propuesto un modelo de programación robusta con protección contra la incertidumbre en el proceso con la finalidad de mejorar los métodos aplicados habitualmente en problemas de planificación de la producción.

En este capítulo se realiza la validación de los modelos detallados en el capítulo anterior, a partir de datos basados en el caso real objeto de estudio para, posteriormente, proceder a la evaluación de los resultados obtenidos y la comparación entre los distintos enfoques de modelado empleados.

5.1 Implementación y resolución

La implementación de los distintos modelos propuestos se ha realizado con la herramienta de modelado MPL (*Mathematical Programming Language*) de Maximal Software, instalada en un equipo PC con procesador Intel Core i5 a 2.80 GHz y 6 GB de memoria RAM. El algoritmo de resolución empleado (solver) es Gurobi (6.5.1). Los parámetros de entrada han sido incluidos en tablas de datos de Microsoft Access, así como los datos de salida, que son exportados también en este tipo de tablas de datos.

El periodo de ejecución de los modelos estudiados ha sido de 6 periodos semanales, con un total de 84 referencias diferentes, que corresponden aproximadamente al 80% del volumen de producción del caso objeto de estudio.

En la Tabla 5.1 se recogen los datos básicos asociados a cada referencia, donde se incluye la referencia (Ic), el rendimiento, el tiempo de fabricación (TF), el tamaño de los lotes productivos (Lotificación), y los costes unitarios de producción (CosteUnitario), posesión (CostePosesión) y retraso (CosteRetraso) para cada producto.

Tabla 5.1. Datos de los productos

Ic	Rendimiento	TF	Lotificacion	CosteUnitario	CostePosesion	CosteRetraso
1	0,9	0,01	100	0,8	0,04	50
2	0,9	0,01	100	0,8	0,04	50
3	0,9	0,01388889	72	1,11	0,06	50
4	0,9	0,01388889	72	1,11	0,06	50
5	0,9	0,01388889	72	1,11	0,06	50
6	0,9	0,00520833	192	0,42	0,02	50
7	0,9	0,01666667	60	1,33	0,07	50
8	0,9	0,01666667	60	1,33	0,07	50
9	0,9	0,00232558	430	0,19	0,01	50
10	0,9	0,00232558	430	0,19	0,01	50
11	0,9	0,00232558	430	0,19	0,01	50
12	0,9	0,01388889	72	1,11	0,06	50
13	0,9	0,01041667	96	0,83	0,04	50
14	0,9	0,01041667	96	0,83	0,04	50

15	0,88	0,00694444	144	0,56	0,03	50
16	0,88	0,00694444	144	0,56	0,03	50
17	0,9	0,01785714	56	1,43	0,07	50
18	0,9	0,01785714	56	1,43	0,07	50
19	0,9	0,00961538	104	0,77	0,04	50
20	0,88	0,02083333	48	1,67	0,08	50
21	0,88	0,02083333	48	1,67	0,08	50
22	0,84	0,00793651	126	0,63	0,03	50
23	0,9	0,02083333	48	1,67	0,08	50
24	0,9	0,02083333	48	1,67	0,08	50
25	0,88	0,02777778	36	2,22	0,11	50
26	0,88	0,02777778	36	2,22	0,11	50
27	0,9	0,08333333	12	6,67	0,17	50
28	0,9	0,01388889	72	1,11	0,06	50
29	0,9	0,01388889	72	1,11	0,06	50
30	0,9	0,01041667	96	0,83	0,04	50
31	0,9	0,00793651	126	0,63	0,03	50
32	0,9	0,02083333	48	1,67	0,08	50
33	0,9	0,02083333	48	1,67	0,08	50
34	0,9	0,00892857	112	0,71	0,04	50
35	0,9	0,02380952	42	1,9	0,1	50
36	0,9	0,02380952	42	1,9	0,1	50
37	0,9	0,00555556	180	0,44	0,02	50
38	0,9	0,00555556	180	0,44	0,02	50
39	0,9	0,01388889	72	1,11	0,06	50
40	0,9	0,03333333	30	2,67	0,13	50
41	0,9	0,01388889	72	1,11	0,06	50
42	0,9	0,07142857	14	5,71	0,29	50
43	0,9	0,04166667	24	3,33	0,17	50
44	0,9	0,00833333	120	0,67	0,03	50
45	0,9	0,00347222	288	0,28	0,01	50
46	0,9	0,01	100	0,8	0,04	50
47	0,9	0,04166667	24	3,33	0,17	50
48	0,9	0,00909091	110	0,73	0,04	50
49	0,9	0,02083333	48	1,67	0,08	50
50	0,9	0,00277778	360	0,22	0,01	50
51	0,9	0,00277778	360	0,22	0,01	50
52	0,9	0,0125	80	1	0,05	50
53	0,9	0,03333333	30	2,67	0,13	50
54	0,9	0,03333333	30	2,67	0,13	50
55	0,9	0,03333333	30	2,67	0,13	50
56	0,88	0,05555556	18	4,44	0,22	50
57	0,88	0,05555556	18	4,44	0,22	50
58	0,9	0,00757576	132	0,61	0,03	50

59	0,9	0,00757576	132	0,61	0,03	50
60	0,9	0,02777778	36	2,22	0,11	50
61	0,9	0,00617284	162	0,49	0,02	50
62	0,9	0,00617284	162	0,49	0,02	50
63	0,9	0,01388889	72	1,11	0,06	50
64	0,9	0,00396825	252	0,32	0,02	50
65	0,9	0,00396825	252	0,32	0,02	50
66	0,9	0,0125	80	1	0,05	50
67	0,9	0,025	40	2	0,1	50
68	0,9	0,08333333	12	6,67	0,33	50
69	0,9	0,0125	80	1	0,05	50
70	0,9	0,08333333	12	6,67	0,33	50
71	0,9	0,04166667	24	3,33	0,17	50
72	0,9	0,01388889	72	1,11	0,06	50
73	0,9	0,02777778	36	2,22	0,11	50
74	0,9	0,05	20	4	0,2	50
75	0,9	0,01388889	72	1,11	0,06	50
76	0,9	0,00925926	108	0,74	0,04	50
77	0,9	0,00925926	108	0,74	0,04	50
78	0,9	0,02777778	36	2,22	0,11	50
79	0,9	0,025	40	2	0,1	50
80	0,9	0,025	40	2	0,1	50
81	0,9	0,015625	64	1,25	0,06	50
82	0,9	0,015625	64	1,25	0,06	50
83	0,9	0,01041667	96	0,83	0,04	50
84	0,9	0,01041667	96	0,83	0,04	50

En la Tabla 5.2 se incluyen las demandas de cada referencia (Ic) a lo largo de cada periodo (Te) del horizonte de planificación (6 semanas).

Tabla 5.2. Demanda de cada referencia en cada periodo del horizonte de planificación

Referencia (Ic)	Demandas					
	Te=1	Te=2	Te=3	Te=4	Te=5	Te=6
1	1300	1300	1300	1300	1300	1300
2	1600	1600	1600	1600	1600	1600
3	3600	3600	3600	3600	3600	3600
4	6000	6000	6000	6000	6000	7000
5	6000	6000	6000	6000	6000	7000
6	300	0	300	0	300	300
7	4500	4500	4500	4500	4500	4500
8	4500	4500	4500	4500	4500	4500
9	4500	4500	4500	4500	4500	4500

10	4500	4500	4500	4500	4500	4500
11	772	772	0	772	0	0
12	1417	1215	1215	1215	1215	2154
13	1013	1215	810	1013	1013	1724
14	1013	810	810	1013	1215	1939
15	1620	1417	1215	1822	1100	1508
16	1417	1620	1013	1822	1215	1293
17	622	420	203	608	1085	0
18	507	405	405	608	405	0
19	0	590	398	398	398	0
20	1898	1544	1367	1735	1876	2972
21	1594	1544	1367	1735	1876	2972
22	1234	1234	1080	1234	1388	2134
23	103	0	102	102	155	108
24	0	50	102	102	155	108
25	1700	1700	1700	1700	1700	1700
26	1700	1700	1700	1700	1700	1700
27	1700	1700	1700	1700	1700	1700
28	400	400	400	400	400	400
29	400	400	400	400	400	400
30	200	200	200	200	200	200
31	300	300	300	300	300	300
32	500	500	500	500	500	500
33	500	500	500	500	500	500
34	120	0	0	100	0	0
35	1200	1200	1200	1200	1200	1200
36	1200	1200	1200	1200	1200	1200
37	1200	1200	1200	1200	1200	1200
38	1200	1200	1200	1200	1200	1200
39	1500	1500	1500	1500	1500	1500
40	0	0	0	400	0	0
41	300	0	300	300	300	0
42	400	400	400	400	500	500
43	1500	1500	1500	1500	1500	1500
44	1500	1500	1500	1500	1500	1500
45	1000	1000	1000	1000	1000	1000
46	200	0	200	200	0	200
47	100	100	150	150	150	150
48	0	100	150	150	150	150
49	100	100	150	150	150	150
50	4500	4500	4500	4500	4500	4500
51	4500	4500	4500	4500	4500	4500
52	600	600	600	600	600	600
53	593	608	528	579	564	553

54	427	499	514	499	369	431
55	1605	1485	2025	2025	2155	2539
56	1350	1350	1350	1350	1350	1350
57	1350	1350	1350	1350	1350	1350
58	1200	1200	1200	1200	1200	1200
59	1200	1200	1200	1200	1200	1200
60	1300	1300	1300	1300	1300	1300
61	1200	1200	1200	1200	1200	1200
62	1200	1200	1200	1200	1200	1200
63	600	600	600	600	600	600
64	250	250	250	250	350	300
65	250	250	250	250	350	300
66	800	800	800	800	800	800
67	2500	2500	2800	2800	2800	2800
68	0	400	400	0	0	0
69	1500	1500	1500	1500	1500	1500
70	1200	1200	1200	1200	1200	1200
71	0	0	0	0	0	180
72	1300	1300	1300	1300	1300	1300
73	600	600	600	600	600	600
74	500	500	500	500	500	500
75	400	400	400	400	400	400
76	420	420	420	420	420	420
77	420	420	420	420	420	420
78	1500	1200	1200	800	800	500
79	1500	1500	1500	1500	1000	750
80	1500	1500	1500	1500	1000	750
81	3300	3300	3300	3300	3300	3300
82	3300	3300	3300	3300	3300	3300
83	3300	3300	3300	3300	3300	3300
84	3300	3300	3300	3300	3300	3300

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los distintos modelos aplicados, así como la comparación entre ellos y el procedimiento heurístico aplicado en la planificación de la producción del caso descrito.

5.1.1 Modelo determinista adaptado de Mula (2004)

La resolución del modelo con el enfoque determinista de Mula (2004) consiste en la minimización de los costes implementados en el modelo, sin tener en cuenta la incertidumbre en el proceso como en el caso del enfoque robusto. En el apartado 4.4 del capítulo anterior se ha definido la formulación matemática de este modelo para el caso objeto de estudio. Además, el código del modelo implementado en el lenguaje de modelado MPL se incluye en el Anexo I del presente trabajo fin de máster.

Los resultados obtenidos para este modelo se muestran en la Tabla 5.3:

Tabla 5.3. Resultados del modelo determinista adaptado de Mula (2004)

Ítem	Procedimiento heurístico	Modelo determinista
Costes de Producción	1077362,35 €	1070643,74 €
Costes de Inventario	2368,79 €	846,64 €
Costes de servicio	6877800 €	740 €
Coste hora ociosa	0	0
Coste hora extra	51600 €	78900 €
Inventario final	13809 piezas	0
Demanda no servida	4%	0%

En la Figura 5.1 se indican los inventarios totales de cada semana a lo largo del horizonte de planificación, obtenidos tanto por el procedimiento heurístico como con el modelo determinista:

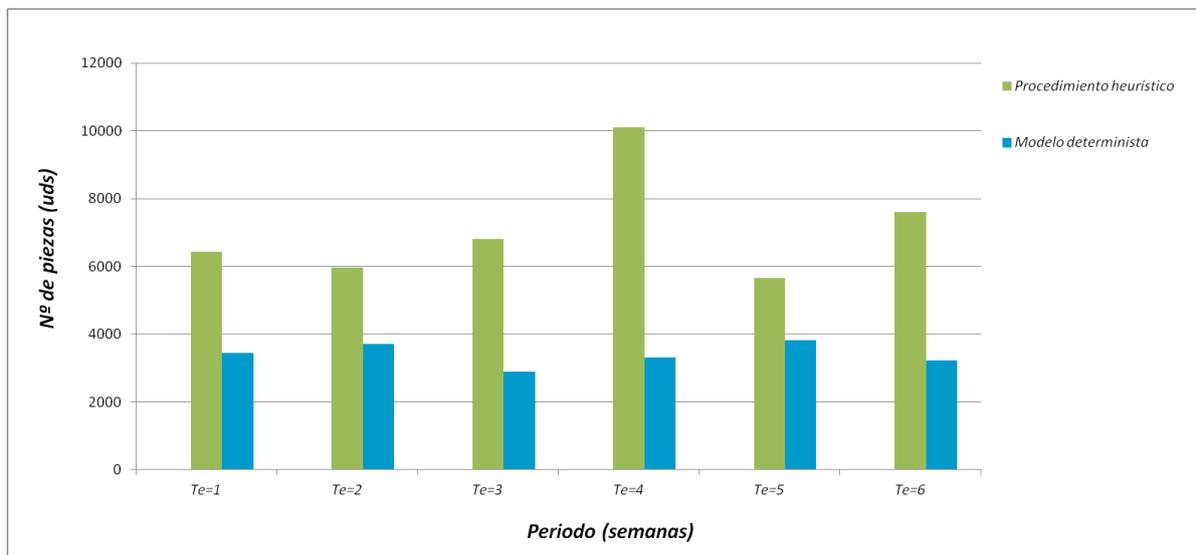


Figura 5.1: Inventario semanal total según el modelo determinista adaptado de Mula (2004)

5.1.2 Modelo robusto con el enfoque de Soyster (1973)

El enfoque de modelado de Soyster (1973) también tiene como objetivo la minimización de los costes implementados en el modelo, pero teniendo en cuenta la incertidumbre en el proceso. En este enfoque, como se ha indicado en los capítulos anteriores, la protección contra la incertidumbre es total, siendo el modelo factible para el caso más desfavorable. Sin embargo, el coste asociado a la incertidumbre del proceso, que implica que aumenten las horas extras para mantener el nivel de servicio, es considerablemente mayor que en el modelo determinista. Los resultados obtenidos para este modelo se muestran en la Tabla 5.4:

Tabla 5.4. Resultados con el enfoque robusto de Soyster (1973)

Ítem	Procedimiento heurístico	Enfoque Soyster (1973)
Costes de Producción	1077362,35 €	1070643,74 €
Costes de Inventario	2368,79 €	846,64 €
Costes de servicio	6877800 €	740 €
Coste hora ociosa	0	0
Coste hora extra	51600 €	212790 €
Inventario final	13809 piezas	0
Demanda no servida	4%	0%

En la Figura 5.2, se indican los inventarios totales de cada semana a lo largo del horizonte de planificación, obtenidos tanto por el procedimiento heurístico como con el enfoque robusto de Soyster (1973).

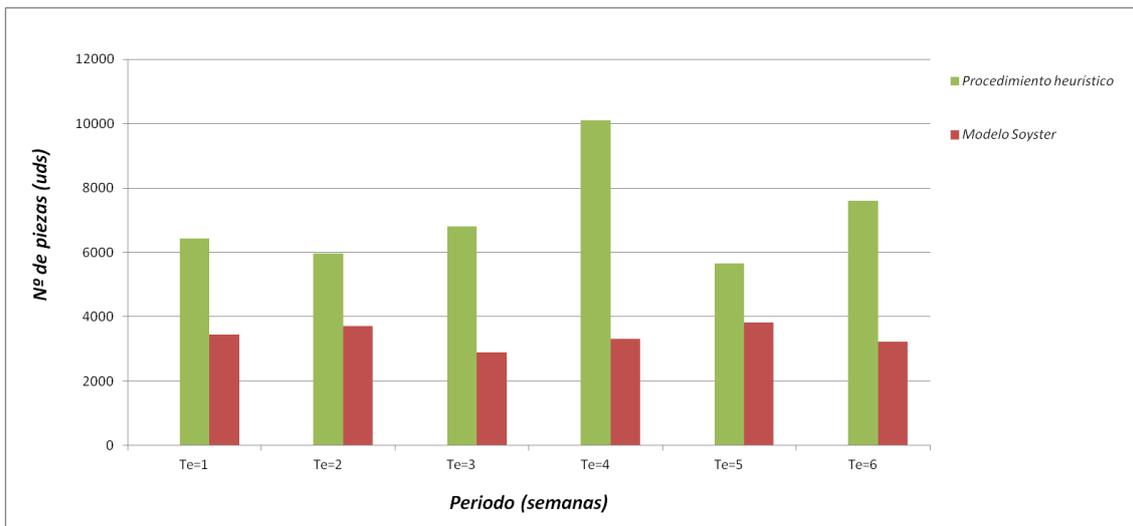


Figura 5.2. Inventario semanal total según el enfoque robusto de Soyster (1973)

5.1.3 Modelo robusto con el enfoque de Bertsimas y Sim (2004)

Para la resolución del modelo con el enfoque robusto de Bertsimas y Sim (2004) se ha ajustado el nivel de conservadurismo por medio del parámetro de control ω . Así, se ha podido contrastar que en el caso de que la incertidumbre afecte a las 84 referencias ($\omega=84$), los resultados coinciden con los del modelo de Soyster (1973). Por otro lado, en caso que se defina $\omega=0$, los resultados obtenidos son similares al modelo determinista.

Los resultados obtenidos están reflejados en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5: Resultados del enfoque robusto de Bertsimas y Sim (2004) (casos límite)

Ítem	Procedimiento heurístico	Modelo Bertsimas y Sim (2004) ($\omega = 0$)	Modelo Bertsimas y Sim (2004) ($\omega = 84$)
Costes de producción	1077362,35 €	1070643,74 €	1070643,74 €
Costes de inventario	2368,79 €	950,37 €	846,64 €
Costes de servicio	6877800 €	740 €	740 €
Coste hora ociosa	0	0	0
Coste hora extra	51600 €	78900 €	212790 €
Inventario final	13809 piezas	0	0
Demanda no servida	4%	0%	0%

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con 3 valores distintos del parámetro de control (ω). En primer lugar, se ha definido un $\omega=5$, lo que implica que 5 referencias se verán afectadas por la máxima variación causada por la incertidumbre del proceso. A continuación, se ha ejecutado el modelo estableciendo un $\omega=10$, lo que ajustaría la robustez del modelo de forma más conservadora, elevando el número de referencias a las que les aplica la incertidumbre del proceso productivo hasta 10. Por último, se ha calculado el modelo para un $\omega=25$, considerando que hasta 25 referencias pudieran ver afectados su tiempo de fabricación hasta un 10%.

Los resultados obtenidos de los experimentos mencionados anteriormente se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Resultados del enfoque robusto de Bertsimas y Sim (2004)

Ítem	Procedimiento heurístico	Modelo Bertsimas y Sim (2004) ($\omega = 5$)	Modelo Bertsimas y Sim (2004) ($\omega = 10$)	Modelo Bertsimas y Sim (2004) ($\omega = 25$)
Costes de Producción	1077362,35 €	1070643,74 €	1070643,74 €	1070643,74 €
Costes de Inventario	2368,79 €	888,76 €	1018,23 €	927,35 €
Costes de servicio	6877800 €	740 €	740 €	740 €
Coste hora ociosa	0	0	0	0
Coste hora extra	51600 €	111560 €	135700 €	177500 €
Inventario final	13809 piezas	0	0	0
Demanda no servida	4%	0%	0%	0%

En la Figura 5.3 se indican los inventarios semanales totales a lo largo del horizonte de planificación, obtenidos tanto por el procedimiento heurístico como por el enfoque robusto de Bertsimas y Sim (2004).

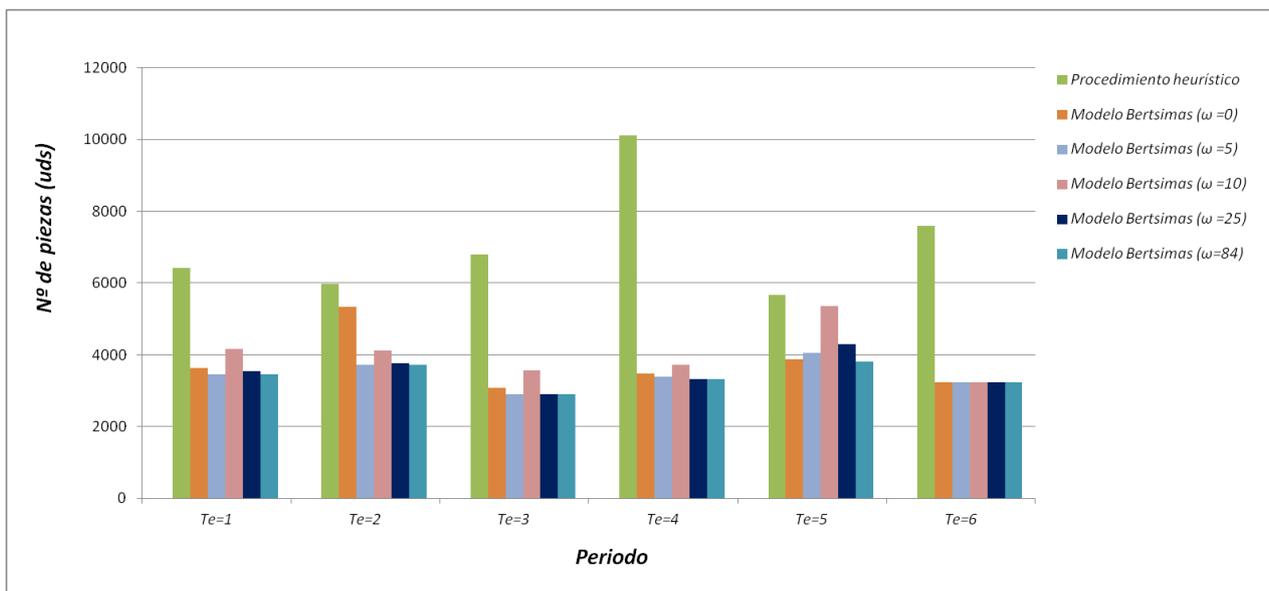


Figura 5.3. Inventario total semanal según el enfoque robusto de Bertsimas y Sim (2004)

5.1.4 Comparación de resultados

En este apartado se va a realizar una comparación entre los distintos modelos propuestos. Para el modelado con el enfoque robusto de Bertsimas y Sim (2004) se va a seleccionar un parámetro de control de robustez (ω) igual a 5, ya que la probabilidad de que más de 5 referencias se vean afectadas por la incertidumbre del proceso es muy baja, con lo que los costes asociados a la robustez no serían asumibles. No obstante, se analiza el modelo con el enfoque robusto de Soyster (1973) como referencia del coste máximo que supone la protección contra la incertidumbre.

En la Tabla 5.8 se resumen los resultados de los distintos modelos analizados para su comparación.

Tabla 5.8: Comparación de los distintos enfoque propuestos

Ítem	Procedimiento heurístico	Modelo determinista	Enfoque robusto Soyster (1973)	Enfoque robusto Bertsimas y Sim (2004) ($\omega = 5$)
Costes de Producción	1077362,35 €	1070643,74 €	1070643,74 €	1070643,74 €
Costes de Inventario	2368,79 €	846,64 €	846,64 €	888,76 €
Costes de servicio	6877800 €	740 €	740 €	740 €
Coste hora ociosa	0	0	0	0
Coste hora extra	51600 €	78900 €	212790 €	111560 €
Inventario final	13809 piezas	0 piezas	0 piezas	0 piezas
Demanda no servida	4%	0%	0%	0%
Tiempo de proceso	162000 s	18,47 s	18,20 s	18,83 s

Como se puede observar, todos los modelos propuestos mejoran el procedimiento heurístico que actualmente se emplea para la elaboración de la planificación de la producción. Se puede observar como los costes productivos son mayores que en los modelos propuestos y, sin embargo, los costes de servicio son muy superiores. Esto es debido a que se fabrican productos por encima del nivel de la demanda, mientras en otras referencias se incurre en el fallo del servicio.

Los costes de inventario en el procedimiento heurístico son mayores que en los modelos propuestos, principalmente por la sobreproducción de referencias con la demanda cubierta.

En referencia al coste de hora ociosa, se puede afirmar que existe un problema de capacidad, ya que en ningún caso es posible satisfacer toda la demanda a lo largo del horizonte de planificación sin recurrir a horas extra.

El coste de horas extra es significativamente mayor en el modelo de Soyster, pero es el único enfoque que puede asegurar el servicio cuando aumentan los tiempos de fabricación de todas las referencias. No obstante, como se ha explicado en el capítulo 3, la incertidumbre en el proceso sólo suele afectar a 5 referencias.

Sin tener en cuenta la incertidumbre en el proceso, el modelo determinista es el que mejores resultados presenta, tanto en los costes asociados a la producción como en los referentes al inventario o servicio. Los costes de producción y servicio son iguales para el modelo determinista y los modelos robustos. Sin embargo, los costes asociados a las horas extra son, considerablemente, mayores en el caso de los modelos robustos, especialmente, en el modelo del enfoque de Soyster (1973). No obstante, en el caso de aparecer la incertidumbre, si la planificación se ha realizado mediante el modelo determinista aparecería un coste por retraso en la demanda, al no haber planificado las horas para cubrir el incremento en los tiempos de proceso para la fabricación de un determinado producto, que sería considerablemente mayor al coste de producir empleando horas extra, que sería el escenario más desfavorable que podría darse.

Con respecto a los niveles de inventario, el procedimiento heurístico actual presenta unos niveles significativamente mayores, como se puede observar en la Figura 5.4.

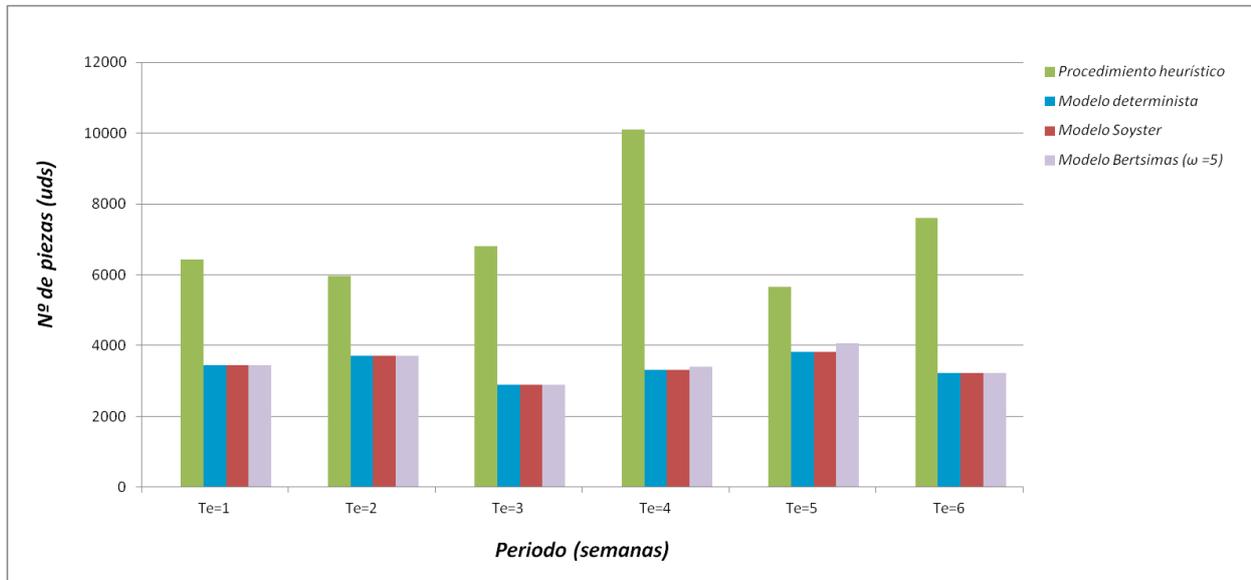


Figura 5.4. Comparación del nivel de inventario total semanal entre los diferentes enfoques

En cuanto al tiempo de proceso para elaborar la planificación de la producción, cabe señalar el significativo ahorro de tiempo empleado modelos de programación matemática, debido a que en el procedimiento heurístico la hoja de cálculo es sólo una ayuda al planificador, que es quien determina qué referencias deben fabricarse. Además, el enfoque robusto no supone un aumento de tiempo extra con respecto al enfoque determinista, ya que ambos emplean modelos de programación lineal.

Por todo lo anteriormente expuesto, aunque el coste de la robustez parezca elevado, compensa asumirlo determinando un parámetro de control de la robustez adecuado. Para el caso objeto de estudio, se considera que la probabilidad de que más de 5 referencias vean afectadas sus tiempos de fabricación debido a la inestabilidad del proceso, averías de máquina, fallos de línea, microparos, etc., es muy reducida, por lo que se considera ajustar un nivel de robustez (ω) entre 1 y 5.

5.2 Conclusiones

En este capítulo se han analizado los resultados de los distintos modelos propuestos, así como el procedimiento heurístico empleado, actualmente, en el problema de planificación de la producción considerado. A partir de los datos reales del caso planteado se han evaluado el modelo determinista adaptado de Mula (2004) y los modelos robustos propuestos a partir de los enfoques de Soyster (1973) y Bertsimas y Sim (2004), atendiendo a los costes productivos, de inventario, servicio y tiempo de proceso.

Una vez analizados los resultados se puede afirmar que la aplicación de un modelo de programación matemática permite obtener mejores resultados que el procedimiento heurístico actualmente empleado.

Además, el enfoque de modelado robusto de Bertsimas y Sim (2004) incorpora la posibilidad de hacer frente a la incertidumbre que puede presentarse en el proceso, permitiendo a través de un

parámetro de control ajustar la protección contra la incertidumbre del modelo, controlando a su vez los costes asociados al precio de la robustez y sin llegar al exceso de conservadurismo del enfoque robusto de Soyster (1973). Cabe indicar que los resultados de los enfoques robustos podrían verse mejorados con respecto al modelo determinista en un contexto de incertidumbre si se reprodujeran en un entorno de simulación de horizonte rodante.

5.3 Referencias

Bertsimas, D. & Sim, M., 2004. The Price of robustness. *Operations Research*, 52(1), pp.35–53.

Mula, J., 2004. *Modelos para la Planificación de la Producción bajo Incertidumbre. Aplicación a una Empresa del Sector del Automóvil*. Departamento de Organización de Empresas, Universidad Politécnica de Valencia.

Soyster, A. L. 1973. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, 21 pp. 1154–1157.

6 Conclusiones y líneas futuras de investigación

6.1 Conclusiones

El presente trabajo fin de máster ha tenido como objetivo la propuesta y utilización de un modelo de programación matemática con un enfoque robusto para la planificación de producción de una empresa del sector de la automoción en contexto de incertidumbre del proceso. Para ello, en primer lugar, se ha realizado una revisión bibliográfica de los últimos trabajos publicados sobre programación robusta aplicada a la planificación de la producción, proponiendo una clasificación de los mismos basada en 9 aspectos: tipo de problema, enfoque de modelado, fuentes de incertidumbre, estructura de la función objetivo, enfoque de la solución, herramientas de desarrollo, aplicación, ventajas y limitaciones. A partir de dicho estudio se han obtenido las siguientes conclusiones: (1) los enfoques de modelado más empleados son el de Bertsimas y Sim (2004), Ben-Tal (1998) y Mulvey (1995), destacando la posibilidad del modelado de Bertsimas y Sim (2004) de transformar dicho modelado en un modelo lineal, cuya resolución es mucho menos compleja con respecto a los modelos no lineales; (2) la fuente principal de incertidumbre considerada en los artículos revisados es la demanda; (3) la mayoría de los artículos revisados tienen una función objetivo centrada en la reducción de costes, pero también hay estudios que buscan la maximización de beneficios; (4) el enfoque de solución más empleado es la programación matemática (lineal y no lineal), empleando el resto de trabajos revisado técnicas metaheurísticas y/o de simulación; (5) como herramienta de resolución, el solver CPLEX es el elegido por la mayoría de los autores; (6) existe un mayor número de modelos aplicados a experimentos teóricos frente a modelos aplicados a casos reales; (7) la ventaja principal presente en todos los estudios revisados es la de robustez de los modelos planteados; (8) de las desventajas recopiladas por los diferentes autores, la simplificación del modelo frente a la realidad es la más mencionada.

Seguidamente, se ha descrito el problema de planificación de la producción objeto de estudio en el presente trabajo, describiendo la técnica heurística empleada actualmente para planificar. A continuación, se han formulado los modelos de programación matemática propuestos para la planificación de la producción, con enfoques determinista (adaptado de Mula, 2004) y robusto (enfoques de Soyster, 1973 y Bertsimas y Sim, 2004) para hacer frente a la incertidumbre del proceso, específicamente, del tiempo requerido de fabricación. Por último, se han analizado y comparado los resultados obtenidos para cada uno de los modelos considerados. En definitiva, se puede concluir que los modelos propuestos mejoran considerablemente el procedimiento heurístico actual, disminuyendo los costes de producción, servicio e inventario. Además, se puede afirmar que el enfoque robusto que proporciona los mejores resultados de los modelos propuestos es el de Bertsimas y Sim (2004), ya que permite obtener una protección contra la incertidumbre sin incurrir en el exceso de conservadurismo de Soyster (1973).

6.2 Líneas futuras de investigación

En el marco teórico definido en el capítulo 2 del presente trabajo final de máster se pueden proponer como líneas futuras de investigación las siguientes:

- (1) Considerar la incertidumbre en el suministro, incluyendo la incertidumbre asociada a las operaciones logísticas.
- (2) Considerar la incertidumbre en la demanda de los diferentes productos.
- (3) Incluir nuevas incertidumbre en el proceso como, por ejemplo, la incertidumbre en el rendimiento del proceso productivo.
- (4) Incorporación del sistema correspondiente a la cadena de suministro al modelo.

Otras líneas futuras de investigación estarían orientadas hacia la utilización y comparación con otros enfoques robustos alternativos así como otras teorías alternativas que gestionan la incertidumbre como la teoría de los conjuntos difusos u otras técnicas de inteligencia artificial. Adicionalmente, la validación y comparativa de modelos de programación matemática tanto deterministas como robustos en otros entornos y problemas de producción reales son otros trabajos que se desean llevar a cabo en un futuro. Por último, la comparativa de modelos robustos y deterministas para un contexto de incertidumbre podría llevarse a cabo en un entorno de simulación de horizonte rodante para que se reflejase de forma más realista el comportamiento de ambos enfoques, determinista y robusto, bajo diversas fuentes de incertidumbre.

6.3 Referencias

- Ben-Tal, a. & Nemirovski, a., 1998. Robust Convex Optimization. *Mathematics of Operations Research*, 23(4), pp.769–805.
- Bertsimas, D. & Sim, M., 2004. The Price of robustness. *Operations Research*, 52(1), pp.35–53.
- Mula, J., 2004. *Modelos para la Planificación de la Producción bajo Incertidumbre. Aplicación a una Empresa del Sector del Automóvil*. Departamento de Organización de Empresas, Universidad Politécnica de Valencia.
- Mulvey, J.M. et al., 1995. Robust optimization of large-scale systems. *Operations Research*, 43(2), pp.264–281.
- Soyster, A. L. 1973. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, 21 pp. 1154–1157.

Anexo I - Implementación de los modelos propuestos en MPL

I.1 Modelo Determinista

{Modelo Determinista (c) Basado en Fini Mula Bru 2003}

TITLE

MRPDet;

OPTIONS

DatabaseType=Access;

DatabaseAccess="PMP_MPL_Bert100_Lot.mdb";

INDEX

{Elementos}

I:=DATABASE("Items", "Ic"); {Conjunto de referencias producidas}

T:=DATABASE("Periodos", "Te"); {Conjunto de periodos de tiempo por Releases}

R:=DATABASE("Recursos", "Ir"); {Recurso disponible}

DATA

{Demanda. Tiempos de fabricación y datos de periodos anteriores}

d[I,T]:=DATABASE("Periodos", "D");

TF[I] :=DATABASE("Items", "TF");

TS[I] :=DATABASE("Items", "TS");

INVT0[I]:=DATABASE("Items", "InventarioActual");

Rd0[I] :=DATABASE("Items", "RetrasoActual");

{Costes. Coeficientes de la función objetivo}

cp[I]:=DATABASE("Items", "CosteUnitario");

ci[I]:=DATABASE("Items", "CostePosesion");

crd[I]:=DATABASE("Items", "CosteRetraso");

ctoc[R]:=DATABASE("Recursos", "CostesTiempoNoEmpleado");

ctex[R]:=DATABASE("Recursos", "CostesTiempoExtra");

{Restricciones de capacidad y tamaño de lote}

AR[I] :=DATABASE("Items", "TF");

CAP[R] :=DATABASE("Recursos", "Capacidad");

lot[I] :=DATABASE("Items", "Lotificacion");

beta[I] :=DATABASE("Items", "Rendimiento");

DECISION

```
P[I,T] -> PR_  
EXPORT REFILL TO DATABASE("Produccion", "P");
```

VARIABLES

```
INVT[I,T] -> IN_  
EXPORT REFILL TO DATABASE("PMP_I", "Inventario");  
Rd[I,T] -> Rd_  
EXPORT REFILL TO DATABASE("PMP_RD", "RetrasoDemanda");  
k[I,T] -> k_  
EXPORT REFILL TO DATABASE("Lotes", "k");  
Toc[R,T] -> To_  
EXPORT REFILL TO DATABASE("PMP_TO", "TiempoNoEmpleadas");  
  
Tex[R,T] -> Te_  
EXPORT REFILL TO DATABASE("PMP_TE", "TiempoExtra");
```

MACROS

```
cpt:=SUM(I,T: P*cp);  
cit:=SUM(I,T: INVT*ci);  
crdt:=SUM(I,T: Rd*crd);  
ctoct:=SUM(R,T: Toc*ctoc);  
ctext:=SUM(R,T: Tex*ctex);
```

MODEL

```
MIN z = cpt + cit + crdt + ctoct + ctext;
```

SUBJECT TO

```
RBalanceInventario[I,T=first(T)] -> RBI:  
INVT0[I]+beta[I]*P[I,T-TS]-INVT[I,T]-Rd0[I]+Rd[I,T]=d[I,T];  
  
RBalanceInventario[I,T>first(T)] -> RBI:  
INVT[I,T-1]+beta[I]*P[I,T-TS]-INVT[I,T]-Rd[I,T-1]+Rd[I,T]=d[I,T];  
  
RRecursosDisponibles[R,T] -> RRD:  
SUM(I: AR*P)+Toc[R,T]-Tex[R,T]=CAP[R];  
  
RLotificacion[I,T] -> RTL:  
P[I,T]= k[I,T]*lot[I];
```

BOUNDS

```
Rd[I=1,T=last(T)] = 0;
```

INTEGER

```
k[I,T];  
P[I,T];  
INVT[I,T];  
Rd[I,T];
```

END

I.2 Modelo robusto con enfoque de Soyster

{Modelo Robusto (c) Basado en el modelo determinista de Fini Mula Bru 2003}

TITLE

```
MRPSoyster;
```

OPTIONS

```
DatabaseType=Access;  
DatabaseAccess="PMP_MPL_Bert100_Lot.mdb";
```

INDEX

{Elementos}

```
I:=DATABASE("Items", "Ic"); {Conjunto de referencias producidas}  
T:=DATABASE("Periodos", "Te"); {Conjunto de periodos de tiempo por Releases}  
R:=DATABASE("Recursos", "Ir"); {Recurso disponible}
```

DATA

{Demanda. Tiempos de fabricación y datos de periodos anteriores}

```
d[I,T]:=DATABASE("Periodos", "D");  
TF[I] :=DATABASE("Items", "TF");  
TS[I] :=DATABASE("Items", "TS");  
INVT0[I]:=DATABASE("Items", "InventarioActual");  
Rd0[I] :=DATABASE("Items", "RetrasoActual");
```

{Costes. Coeficientes de la función objetivo}

```
cp[I]:=DATABASE("Items", "CosteUnitario");  
ci[I]:=DATABASE("Items", "CostePosesion");  
crd[I]:=DATABASE("Items", "CosteRetraso");
```

```
ctoc[R]:=DATABASE("Recursos", "CostesTiempoNoEmpleado");
ctex[R]:=DATABASE("Recursos", "CostesTiempoExtra");

{Restricciones de capacidad y tamaño de lote}
AR[I] :=DATABASE("Items", "TF");
CAP[R] :=DATABASE("Recursos", "Capacidad")
ARv[I] :=DATABASE("Items", "TF");
lot[I] :=DATABASE("Items", "Lotificacion");
beta[I] :=DATABASE("Items", "Rendimiento");
P[I,T]:=DATABASE("Produccion", "P");

DECISION
P[I,T] -> PR_
EXPORT REFILL TO DATABASE("Produccion", "P");

VARIABLES
INVT[I,T] -> IN_
EXPORT REFILL TO DATABASE("PMP_I", "Inventario");
Rd[I,T] -> Rd_
EXPORT REFILL TO DATABASE("PMP_RD", "RetrasoDemanda");
k[I,T] -> k_
EXPORT REFILL TO DATABASE("Lotes", "k");
Toc[R,T] -> To_
EXPORT REFILL TO DATABASE("PMP_TO", "TiempoNoEmpleadas");

Tex[R,T] -> Te_
EXPORT REFILL TO DATABASE("PMP_TE", "TiempoExtra");
Py[I,T];

MACROS
cpt:=SUM(I,T: P*cp);
cit:=SUM(I,T: INVT*ci);
crdt:=SUM(I,T: Rd*crd);
ctoct:=SUM(R,T: Toc*ctoc);
ctext:=SUM(R,T: Tex*ctex);

MODEL
MIN z = cpt + cit + crdt + ctoct + ctext;

SUBJECT TO
RBalanceInventario[I,T=first(T)] -> RBI:
```

```

INVT0[I]+beta[I]*P[I,T-TS]-INVT[I,T]-Rd0[I]+Rd[I,T]=d[I,T];

RBalanceInventario[I,T>first(T)] -> RBI:
INVT[I,T-1]+beta[I]*P[I,T-TS]-INVT[I,T]-Rd[I,T-1]+Rd[I,T]=d[I,T];

RRecursosDisponibles[R,T] -> RRD:
SUM(I: AR*P)+SUM(I: ARv*Py)+Toc[R,T]-Tex[R,T]=CAP[R];

RLotificacion[I,T] -> RTL:
P[I,T]= k[I,T]*lot[I];
RSoyster1[I,T]:
P[I,T]=Py[I,T];

BOUNDS
Rd[I=1,T=last(T)] = 0;

INTEGER
k[I,T];
P[I,T];
Py[I,T]
INVT[I,T];
Rd[I,T];

END

I.3 Modelo robusto con enfoque de Bertsimas
{Modelo Robusto (c) Basado en el modelo determinista de Fini Mula Bru 2003}
TITLE
MRPBertsimas;

OPTIONS
DatabaseType=Access;
DatabaseAccess="PMP_MPL_Bert100_Lot.mdb";

INDEX
{Elementos}
I:=DATABASE("Items", "Ic"); {Conjunto de referencias producidas}
T:=DATABASE("Periodos", "Te"); {Conjunto de períodos de tiempo por Releases}

```

```
R:=DATABASE("Recursos","Ir"); {Recurso disponible}
```

DATA

```
{Demanda. Tiempos de fabricación y datos de periodos anteriores}
```

```
d[I,T]:=DATABASE("Periodos", "D");  
TF[I] :=DATABASE("Items", "TF");  
TS[I] :=DATABASE("Items", "TS");  
INVT0[I]:=DATABASE("Items", "InventarioActual");  
Rd0[I] :=DATABASE("Items", "RetrasoActual");
```

```
{Costes. Coeficientes de la función objetivo}
```

```
cp[I]:=DATABASE("Items", "CosteUnitario");  
ci[I]:=DATABASE("Items", "CostePosesion");  
crd[I]:=DATABASE("Items", "CosteRetraso");  
ctoc[R]:=DATABASE("Recursos", "CostesTiempoNoEmpleado");  
ctex[R]:=DATABASE("Recursos", "CostesTiempoExtra");
```

```
{Restricciones de capacidad y tamaño de lote}
```

```
AR[I] :=DATABASE("Items","TF");  
CAP[R] :=DATABASE("Recursos", "Capacidad")  
ARv[I] :=DATABASE("Items","TF");  
lot[I] :=DATABASE("Items", "Lotificacion");  
beta[I] :=DATABASE("Items","Rendimiento");  
 $\omega$ [R,T]:=100;
```

DECISION

```
P[I,T] -> PR_  
EXPORT REFILL TO DATABASE("Produccion", "P");
```

VARIABLES

```
INVT[I,T] -> IN_  
EXPORT REFILL TO DATABASE("PMP_I", "Inventario");  
Rd[I,T] -> Rd_  
EXPORT REFILL TO DATABASE("PMP_RD", "RetrasoDemanda");  
k[I,T] -> k_  
EXPORT REFILL TO DATABASE("Lotes", "k");  
Toc[R,T] -> To_  
EXPORT REFILL TO DATABASE("PMP_TO", "TiempoNoEmpleadas");  
  
Tex[R,T] -> Te_
```

```
EXPORT REFILL TO DATABASE("PMP_TE", "TiempoExtra");
Pb[I,R,T];
Py[I,T];
Z[R,T];
```

MACROS

```
cpt:=SUM(I,T: P*cp);
cit:=SUM(I,T: INVT*ci);
crdt:=SUM(I,T: Rd*crd);
ctoct:=SUM(R,T: Toc*ctoc);
ctext:=SUM(R,T: Tex*ctex);
```

MODEL

```
MIN z = cpt + cit + crdt + ctoct + ctext;
```

SUBJECT TO

```
RBalanceInventario[I,T=first(T)] -> RBI:
    INVT0[I]+beta[I]*P[I,T-TS]-INVT[I,T]-Rd0[I]+Rd[I,T]=d[I,T];

RBalanceInventario[I,T>first(T)] -> RBI:
    INVT[I,T-1]+beta[I]*P[I,T-TS]-INVT[I,T]-Rd[I,T-1]+Rd[I,T]=d[I,T];

RRecursosDisponibles[R,T] -> RRD:
    SUM(I: AR*P)+SUM(I: ARv*Py)+Toc[R,T]-Tex[R,T]=CAP[R];

RLotificacion[I,T] -> RTL:
    P[I,T]= k[I,T]*lot[I];

RBertsimas1[I,T]:
    P[I,T]=Py[I,T];

RBerstimas2[R,T,I]:
    Z[R,T]+Pb[R,I,T]>=ARv*Py;
```

BOUNDS

```
Rd[I=1,T=last(T)] = 0;
Z[R,T]>=0;
Pb[R,I,T]>=0;
```

INTEGER



k [I , T] ;
P [I , T] ;
Py [I , T]
INVT [I , T] ;
Rd [I , T] ;

END