

Heurísticas Dinámicas para el *DCC-ELSP*

Pilar I. Vidal-Carreras¹, Jose P. Garcia-Sabater¹, Julien Maheut¹, Julio J. Garcia-Sabater¹

¹ ROGLE - Dpto. de Organización de Empresas. Escuela Politécnica Superior. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera, s/n 46022. Valencia. pivicar@omp.upv.es, jpgarcia@omp.upv.es, juma2@upvnet.upv.es, jugarsa@omp.upv.es,

Palabras clave: Heurística, *DCC-ELSP*, Simulación

1. Introducción

En este artículo se presentan una serie de heurísticas para la resolución del problema del *DCC-ELSP* (*Deliberated and Controlled Coproduction Economic Lot Scheduling Problem*), es decir, Problema de Programación del Lote Económico con Coproducción Deliberada y Controlada (Vidal-Carreras, 2011b) Señalar que existe coproducción cuando un proceso productivo da como resultado más de un producto de manera simultánea (Deuermeyer y Pierskalla, 1978). Si se conoce toda la información sobre los parámetros de producción (tiempos, costes, ratios de fabricación...) se dice que la coproducción es controlada. Si se puede decidir fabricar con coproducción o independientemente cada producto se dice que la coproducción es deliberada (Vidal-Carreras, 2011a)

Se diseñan cuatro heurísticas que van a considerar unos tiempos de ciclo para cada una de las opciones productivas que son dinámicos en el tiempo y que van a ser capaces de establecer planes de fabricación que indiquen en cada periodo productivo el producto o productos a fabricar, considerando la posibilidad de coproducción, y la cantidad prevista a fabricar. Las heurísticas se van a aplicar en un entorno multi-item mixto, en el que se considera la posible coproducción deliberada y controlada de productos en parejas de dos, y la producción de manera aislada de otros productos. Se va a evaluar si las heurísticas modelan adecuadamente el fenómeno de coproducción, para ello, se simularán a partir de unos experimentos de cuyos resultados se obtendrán conclusiones.

En la literatura se encuentran pocos trabajos que hablen explícitamente sobre coproducción controlada y deliberada. Sin embargo, el número de referencias sobre coproducción incontrolada es mucho más numeroso y normalmente se presupone que también es no deliberada. La mayoría trata de campos aleatorios (coproducción incontrolada) con demanda sustituible (Bitran y Leong, 1995; Gerchak et al., 1996; Nahmias y Moynzadeh, 1997; Oner y Bilgic, 2008). El trabajo de Deuermeyer y Pierskalla (1978) es el primero y único conocido que considera coproducción con un rendimiento fijo, por lo que podemos afirmar que esta coproducción está controlada y deliberada (*DCC*). En este trabajo abordamos este problema *DCC* desde un punto de vista muy distinto a puesto que basamos nuestro modelo en el

Economic Lot Sizing Scheduling Problem (*ELSP*) (Bomberger, 1966; Sun et al., 2010), resultado el *DCC-ELSP*.

Así, la estructura del trabajo es la siguiente, en el apartado 2 se describirá el problema, en el apartado 3 las heurísticas, en el apartado 4 el modelo de simulación, en el apartado 5 los resultados, para terminar con las conclusiones del apartado 6.

2. Descripción del Problema

Se considera el problema *DCC-ELSP* un problema de secuenciación de productos y coproductos con búsqueda de patrones cíclicos de producción (Bomberger, 1966; Sun et al., 2010) que minimicen los costes totales. Las hipótesis de trabajo son las siguientes:

- Mas de un producto, i or $i + j$, se puede producir al mismo tiempo en una máquina
- Los ratios de producción de producción y coproducción son deterministas y constantes, p_i, p_{ij} respectivamente
- Los costes de setup de los productos A_i, A_{ij} y los tiempos de setup c_i, c_{ij} en producción y coproducción respectivamente, son independientes del orden de producción
- La demanda de los productos es estocástica con valor d_i
- Los costes de almacenamiento h_i son directamente proporcionales a los niveles de inventario

La resolución del problema *DCC-ELSP* implica decidir qué productos fabricar, cómo fabricarlos y cuanto fabricar de cada uno de los distintos productos/coproductos con su opción productiva (producción o coproducción).

3. Heurísticas

Las cuatro heurísticas diseñadas se basan en la modificación y combinación de las heurísticas de (Fransoo, 1993) y la heurística de la Longitud de Ciclo Dinámica (Leachman y Gascon, 1988), considerar la coproducción deliberada y controlada. Estas nuevas heurísticas dinámicas partiendo de una política multi-ítem (s, S) van a considerar unos tiempos de ciclo para cada una de las opciones productivas (producción o coproducción) que son dinámicos en el tiempo. Estos tiempos de ciclo, que dependen de la holgura entre opciones productivas, son revisados periodo a periodo para poder responder a las diferencias entre los niveles de inventario planeados y los niveles de inventario reales así como los cambios en los ratios de demanda. Se considera que existe holgura positiva entre dos opciones de producción, denominadas consecutivas en la secuencia de producción, si se estima que va a haber tiempo suficiente para completar en su totalidad la cantidad de producción de la correspondiente opción productiva. Y esto debe ocurrir antes de que los inventarios del producto o coproductos de la siguiente opción productiva, caigan por debajo de su correspondiente punto de relanzamiento (s). Si no existe tiempo suficiente para cumplir esta condición, se afirma que existe holgura negativa entre estas opciones productivas. Se introduce un valor de *MinimaHolgura* que puede tomar distintos valores y que permite regular la distancia que debiera existir entre dos órdenes de producción.

Las heurísticas planteadas: DCL1-DCC, DCLMax1-DCC, DCL2-DCC y DCLMax2-DCC para resolver el problema DCC-ELSP deben responder a las preguntas de qué fabricar, cómo fabricarlo y cuánto fabricar de los distintos productos con su opción productiva (Vidal-Carreras, 2010).

Para decidir en cada heurística qué producto se ha de producir se emplean los tiempos del ratio de cobertura. El ratio de cobertura o *run out* es un concepto muy empleado en la realidad industrial que hace referencia a las unidades de tiempo de demanda de las que se dispone en inventario. Si se define la posición de un producto en la secuencia de *RO* como $pos(i)$ tendríamos la secuencia productiva, definida por los *RO* de los productos ordenados de acuerdo con los valores de $pos(i)$ decrecientes. El producto *i* en primera posición de producción es aquel cuya variable $pos(i)$ es igual a 1.

Para decidir como se ha de fabricar se aplica en primer lugar el algoritmo DCC-ELSP-2P (Vidal-Carreras, 2010) que luego se adapta a las situaciones dinámicas de la demanda de acuerdo con las reglas de coproducción siguientes basadas en la secuencia del Ratio de Cobertura: Las reglas a continuación listadas se basan en la relación que existe en la secuencia entre el ratio de cobertura del producto a fabricar *i* con $pos(i)=1$ y el ratio de cobertura de su coproducto *j*.

- (1) $pos(j) \leq 2$
- (2) $pos(j) \leq 3$
- (3) $pos(j) \leq 4$
- (4) $pos(j) \leq 5$

Si la condición correspondiente se cumple, la coproducción entre los productos *i* y *j* se produce. La condición (1) indica que el coproducto *j* es el siguiente al producto *i* en la secuencia de ratios de cobertura. Las condiciones (2), (3) y (4) amplían la holgura en la secuencia de los ratios de cobertura.

Para decidir en que cantidad se ha de fabricar se aplican las correspondientes heurísticas. El tiempo de ciclo inicial a partir del cual se definen los correspondientes inventarios de los productos y coproductos, se calcula siguiendo un método iterativo con tiempos de ciclo económicos con coproducción múltiplos enteros de valor k_i de un periodo denominado base, T_{pb} de acuerdo con (Vidal-Carreras, 2011b).

3.1. DCL1-DCC y DCLMax1-DCC

La heurística DCL1-DCC es *preemptive* mientras que la heurística DCLMax1-DCC es *non-preemptive*, es decir se fabrica un producto hasta llegar a su nivel máximo, independientemente de lo que le ocurran al resto de productos del sistema. Sin embargo, el procedimiento para el cálculo de las holguras es equivalente en ambos casos. Así se resume a continuación. Partiendo de que todos los productos se ordenan de acuerdo a su *RO* se realiza lo siguiente:

1. Se calculan las holguras asociadas al reposicionamiento de los productos (*w*) que no son candidatos a producirse en este momento, de acuerdo con las ecuaciones (1) y (2).. Se denomina (*k*) al posible coproducto de (*w*). Se obtiene restando el tiempo de setup y el tiempo de producción de todos los ítems que deben ser producidos antes de que el ítem con su opción productiva correspondiente llegue a su tiempo de *run out*.

$$TS = \begin{cases} \text{Coproducción "w + k"} \longrightarrow TS_{wk} \\ \text{No Coproducción "w"} \longrightarrow TS_w \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} TS_w &= TS_{wk} \quad = \\ &= RO_w - \\ &- \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i \in C}} c_i - \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i, j \in C}} (nc_i + mc_{ij}) - \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i \in C}} T_{pb} k_i d_i / \rho_i - \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i, j \in C}} \left(n \frac{Q_i}{P_i} + m \frac{Q_{ij}}{P_{ij}} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

2. Si existe alguna holgura negativa, los tiempos de ciclo no pueden mantenerse. Para resolver la infactibilidad, el tiempo de ciclo se reduce de modo que todas las holguras sean positivas (3).

$$TS_w \geq 0 \cup TS_{wk} \geq 0 \quad (3)$$

Para conseguir esto, el nuevo tiempo de ciclo Top, denominado tiempo de ciclo operativo se calcula del siguiente modo.

$$T_{op} = \alpha T_{pb} \quad (4)$$

$$\alpha = \min \left\{ 1, \min_w \frac{RO_w - \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i \in C}} c_i + \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i, j \in C}} (nc_i + mc_{ij})}{\sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i \in C}} T_{pb} k_i d_i / \rho_i + \sum_{\substack{pos(i)=pos(w)-1 \\ i, j \in C}} \left(n \frac{Q_i}{P_i} + m \frac{Q_{ij}}{P_{ij}} \right)} \right\} \quad (5)$$

Con este nuevo tiempo de ciclo se recalculan los parámetros asociados al tiempo de ciclo, esto es, los inventarios de seguridad ss, y los niveles mínimos s y máximos S de producción para todas las opciones productivas, donde n es el número de veces n que se lanzará la fabricación del producto i y m el número de veces m que se coproducirá i+j.

3. Se calcula la cantidad a producir de los productos i y j cuando se producen conjuntos Qij, o aislados Qi de acuerdo con las reglas de coproducción. Se calcula la cantidad a producir de los productos i y j cuando se producen conjuntos. Es decir, Qij (cantidad de producto i a producir cuando se coproduce con j) y Qij (cantidad de producto j a producir cuando se coproduce con i). Para esto, se consideran los niveles máximos a alcanzar para cada producto, esto es, S y los inventarios actuales I. A partir de esto, se busca el parámetro común durante el proceso de fabricación de i con j que es el tiempo de fabricación tij.

$$\left. \begin{aligned} t1_{ij} &= \frac{S_{ij} - I_i}{P_{ij}} \\ t1_{ji} &= \frac{S_{ji} - I_j}{P_{ji}} \end{aligned} \right\} \rightarrow \begin{cases} t'_{ij} = \min(t1_{ij}, t1_{ji}) \rightarrow \\ t_{ij} = \min(t'_{ij}, \text{uds de tiempo disponible en el periodo}) \end{cases} \quad (6)$$

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

$$Q_{ij}^t = t_{ij} P_{ij} \quad (7)$$

$$Q_{ji}^t = t_{ji} P_{ji}$$

Se calcula la cantidad a producir del producto *i*, es decir Q_i , cuando se produce de manera aislada. Para esto se consideran los niveles máximos a alcanzar por el producto, esto es, S y los inventarios actuales I . Para el cálculo de Q_i , se considera el tiempo disponible en el periodo para fabricar. Este tiempo para fabricar, se obtiene descontando al tiempo real el tiempo de *setup* del proceso de acuerdo con (8).

$$t'_i = \frac{S_i - I_i}{P_i} \rightarrow t_i = \min(t'_i, \text{uds de tiempo disponible en el periodo}) \quad (8)$$

En el caso de que el tiempo disponible para la fabricación t_i tenga un valor negativo se iguala a cero. Esto es, porque en el periodo no existe tiempo suficiente para el *setup* del proceso. Se puede calcular la cantidad a producir del producto en ese periodo (9):

$$Q_i^t = t_i P_i \quad (9)$$

3.2. DCL2-DCC y DCLMax2-DCC

La heurística DCL2-DCC es *preemptiva* mientras que la heurística DCLMax2-DCC no lo es. Sin embargo el procedimiento para el cálculo de las holguras es equivalente en ambos casos. Partiendo de que todos los productos se ordenan de acuerdo a su *RO* se realiza lo siguiente:

1. Se calculan las holguras asociadas al reposicionamiento de los productos (w) que no son candidatos a producirse en este momento. Se denomina (k) al posible coproducto de (w). Se obtiene restando el tiempo de *setup* y el tiempo de producción de todos los ítems que deben ser producidos antes de que el ítem con su opción productiva correspondiente llegue a su tiempo de *run out*

$$TS_w = RO_w - \sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} c_i - \sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} T_{pbk_i} d_i / \rho_i \quad (10)$$

2. Si existe alguna holgura negativa se recalculan las holguras de acuerdo con siendo el nuevo tiempo de ciclo, T_{op} denominado tiempo de ciclo operativo se calcula del siguiente modo

$$T_{op} = \alpha T_{pb} \quad (11)$$

$$\alpha = \min \left\{ 1, \min_w \frac{RO_w - \sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} c_1}{\sum_{pos(i)=1}^{pos(i)=pos(w)-1} k_i d_i / p_i} \right\} \quad (12)$$

Con este nuevo tiempo de ciclo se recalculan los parámetros asociados al tiempo de ciclo, esto es, los inventarios de seguridad ss , y los niveles mínimos s y máximos S de producción para todas las opciones productivas de acuerdo con las fórmulas que se describirán en el artículo completo.

3. Se calcula la cantidad a producir de los productos i y j cuando se producen conjuntos, o aisladas de acuerdo con las reglas de coproducción del mismo modo que en la anterior heurística (apartado 3.1).

4. Modelo de Simulación

El modelo de simulación se desarrolla con el lenguaje JAVA sobre la plataforma Anylogic. Respecto a los datos de entrada para incorporar la coproducción deliberada y controlada, se decide incorporar dos parejas de coproductos a los datos de Bomberger (1966), resultando un sistema multi-ítem mixto en el que el 40% de los productos pueden coproducirse, Tabla 1.

Tabla 1. Datos de Bomberger modificados con coproducción (ratio de utilización 88%)

Opción Productiva	Producto	Coste de Setup	Coste Unitario	Ratio de Producción (ud/día)	Demanda (ud/día)	Tiempo Setup (horas)
1	1	15	0,065	30000	400	1
2	2	20	0,1775	8000	400	1
3	3	30	0,1275	9500	800	2
2+3	2 3	25	0,1775	4000	4750	800
4	4	10	0,1	7500	1600	1
5	5	110	2,785	2000	80	4
6	6	50	0,2675	6000	80	2
5+6	5 6	80	2,785	1000	3000	80
7	7	310	1,5	2400	24	8
8	8	130	5,9	1300	340	4
9	9	200	0,9	2000	340	6
10	10	5	0,04	15000	400	1

En la Tabla 1 se observa como los coproductos son: el producto 2, que puede coproducirse con el producto 3 y el producto 5, que puede coproducirse con el producto 3 con el producto

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

Se considera una demanda estocástica o probabilística, concretamente estacionaria. Se asume que la demanda sigue una distribución normal, con un coeficiente de variación de 0.1. En las diferentes heurísticas se van a considerar unos valores para los inventarios iniciales del 40% del valor de los inventarios máximos. Es curioso, que aunque existen heurísticas muy sensibles al valor de los inventarios iniciales, en la mayoría de artículos revisados sobre simulación de heurísticas, el valor de este inventario no aparece explícitamente (Soman et al., 2004a). En (Gascon et al., 1994) se comenta que los inventarios iniciales se establecen suficientemente altos, de modo que se quiere evaluar cómo responden todas las heurísticas con exceso de inventarios iniciales frente a las pruebas para demandas estocásticas estacionarias.

4.1. Dinámica del Modelo de Simulación

La secuencia de tiempo en el modelo de simulación es el siguiente:

- La demanda de cada producto se genera al inicio de cada período. La demanda se completa desde el inventario. Se actualizan los niveles de inventario. Si la demanda no se puede satisfacer se pierde de acuerdo con los costes de pérdidas de ventas proporcionales a las unidades perdidas y al coste por unidad.
- Al inicio de cada periodo, los tiempos de run out se calculan para todos los productos. Siempre que no se continúe la producción del día anterior, se escoge aquel que tiene el menor run out para su fabricación en ese día.
- El modo de producir los productos (con o sin coproducción) se escoge de acuerdo con las reglas de coproducción establecidas. Las cantidades de producción se calculan de acuerdo con los criterios de la heurística escogida. Si se trata de heurísticas *preemptives* la producción se interrumpirá cuando algún ítem caiga por debajo de su nivel mínimo de stock. Si se trata de heurísticas no *preemptive* siguiendo la idea de (Fransoo et al., 1995) se mantendrá la producción de un ítem hasta que alcance sus niveles máximos de inventario independientemente de lo que le suceda al resto de ítems. Este planteamiento intenta mantener los tiempos de ciclo todo el tiempo posible.
- La producción diaria de cada ítem se pone en el inventario al final del día.

Se considera que cada periodo es un día. Como se ha comentado para cada heurística se lanza una simulación de 960 días.

5. Resultados y Análisis

Tras realizar la simulación, se presentan los resultados obtenidos para cada una de las heurísticas de acuerdo con la Figura 1 y la Tabla 2. Así en la Figura 1 se representan los

costes totales con cada una de las reglas de selección de coproducción para las cuatro heurísticas. En la Figura 1 se observa claramente como independientemente de la regla de selección de coproducción escogida las heurísticas dinámicas no *preemptives* (DCLMax1-DCC y DCLMax2-DCC) presentan mejores resultados que las heurísticas *preemptives* con un margen de mejora muy elevado. (DCL1-DCC, DCL2-DCC):

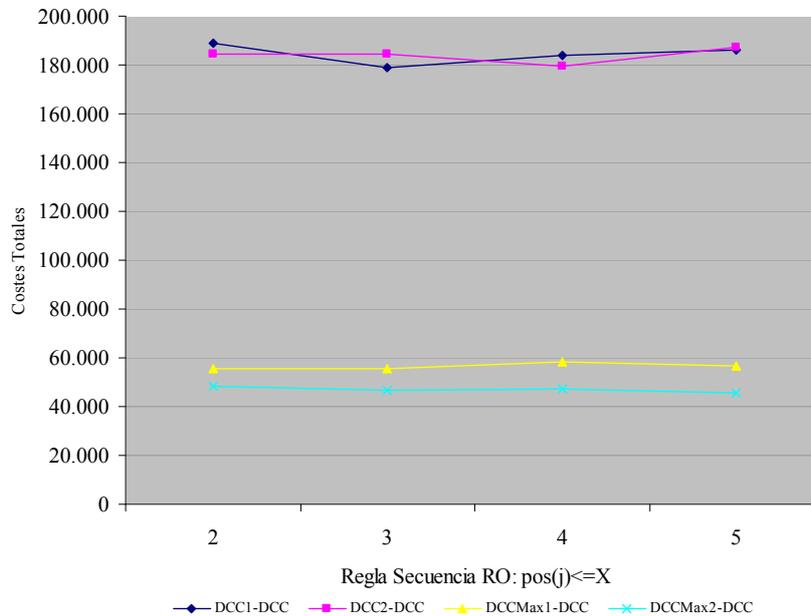


Figura 1 Costes Totales para las heurísticas

En la siguiente Tabla 2 se desglosan los costes totales en los costes de setup, los costes de inventario y las pérdidas de ventas.

.Tabla 2. Desglose de Costes Totales para cada heurística

Heurística	RO pos(j) ≤	Costes de Setup	Costes de Inventario	Pérdidas de Ventas	Costes Totales
DCC1-DCC	2	92.795	3.475,70	92.685,87	188.956,57
	3	88.330	4.047,50	86.745,87	179.123,36
	4	88.305	4.044,55	91.489,68	183.839,24
	5	91.110	3.925,92	91.290,07	186.325,99
DCC2-DCC	2	89.505	4.758,27	90.059,47	184.322,75
	3	90.655	4.657,43	88.893,65	184.206,08
	4	88.595	3.930,01	86.834,44	179.359,44
	5	90.260	4.905,74	91.780,77	186.946,50
DCCMax1-DCC	2	31.920	13.439,71	10.414,91	55.774,62
	3	30.995	13.694,96	10.942,05	55.632,01
	4	31.255	16.320,75	10.652,16	58.227,91
	5	31.570	15.223,19	9.634,12	56.427,31
DCCMax2-DCC	2	25.450	18.160,50	4.897,31	48.507,81
	3	23.470	18.738,10	4.692,72	46.900,81
	4	24.285	18.779,73	4.238,17	47.302,90
	5	25.745	16.715,43	3.066,86	45.527,29

Como se observa en la tabla, los mejores resultados se obtienen con la heurística DCCMax2-DCC y concretamente con una regla de selección de coproducción bastante amplia. La regla de coproducción permite fabricar de manera conjunta un producto con su coproducto aunque este se encuentre hasta 4 posiciones detrás del producto a fabricar. La siguiente heurística DCCMax1-DCC es *preemptive* como la anterior, pero de acuerdo al desarrollo de la misma (apartado 3.1) intenta ajustar más los tiempos de ciclo como fórmulas más elaboradas. Para este caso planteado esto no presenta una mejora de los resultados

Resulta muy interesante analizar la gran diferencia de resultados entre las heurísticas *preemptives* y las no *preemptives*. Si seguimos el planteamiento inicial de las heurísticas, estas se basan en la idea de recalcular los tiempos de ciclo de los productos para adaptarse a las nuevas condiciones de la demanda y de los inventarios, concretamente recalculando el tiempo de ciclo base. Así, el nuevo tiempo de ciclo calculado se denomina tiempo operativo y pretende establecer un equilibrio entre los inventarios y las demandas de las de los distintos ítems, que varían en cada periodo de tiempo. Por tanto parece lógico que aquellas heurísticas que respetan por más tiempo los nuevos tiempos de ciclo recalculado, esto es heurísticas *preemptives* (DCLMax1-DCC y DCLMax2-DCC) alcancen mejores resultados. Esto pone de manifiesto que en ocasiones heurísticas demasiado sensibles y sobreajustadas pueden conducir a “chaotic spike” (Wilding, 1998) que disparan las pérdidas de ventas.

6. Conclusiones

En este artículo se pretende resolver el problema DCC-ELSP mediante la modificación y combinación de las heurísticas de (Fransoo, 1993) y la heurística de la Longitud de Ciclo Dinámica (Leachman y Gascon, 1988). Así se desarrollan cuatro heurísticas, dos *preemptives*, que modifican una orden de producción en función del compartamiento del resto de productos y dos no *preemptives* que intentan mantener planes de fabricación con ciclos más estables. Se desarrolla un modelo de simulación para analizar los resultados para los datos de Bomberger al 88% de utilización modificados con coproducción. De los resultados obtenidos en la simulación se concluye que en ambientes de alta utilización las heurísticas *preemptives* pueden producir mejores resultados que las heurísticas no *preemptives* pues evitan que el sistema entre en “chaotic spike” (Wilding, 1998). Esta conclusión refuerza la idea presente en (Soman et al., 2004b) que destacaba el posible buen funcionamiento de la heurística de (Fransoo, 1993) en sistemas de alta utilización.

Agradecimientos

El presente trabajo se ha desarrollado gracias a la ayuda DPI2010-18243 del MICINN con el título "Coordinación de operaciones en redes de suministro/demanda ajustadas, resilientes a la incertidumbre: modelos y algoritmos para la gestión de la incertidumbre y la complejidad", así como la beca doctoral VALi+d concedida por la Generalitat Valenciana a Julien Maheut (Ref. ACIF/2010).

Referencias

- Bitran, G. B.; Leong, T. Y. (1995). Coproduction of Substitutable Products. *Production Planning & Control*, Vol. 6, No. 1, pp. 13-25.
- Bomberger, E. E. (1966). A dynamic programming approach to a lot size scheduling problem. *Management Science*, Vol. 12, No. 11, p. 778.

- Deuermeyer, B. L.; Pierskalla, W. P. (1978). By-Product Production System with An Alternative. *Management Science*, Vol. 24, No. 13, pp. 1373-1383.
- Fransoo, J. C. (1993): *Production Control and demand management in capacited flow process industries. Ph.D. Thesis*, Technische Universiteit Eindhoven.
- Fransoo, J. C.; Sridharan, V.; Bertrand, J. W. M. (1995). A Hierarchical Approach for Capacity Coordination in Multiple Products Single-Machine Production Systems with Stationary Stochastic Demands. *European Journal of Operational Research*, Vol. 86, No. 1, pp. 57-72.
- Gascon, A.; Leachman, R. C.; Lefrancois, F. (1994). Multi-item, single-machine scheduling problem with stochastic demands: a comparison of heuristics. *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 3, pp. 583-596.
- Gerchak, Y.; Tripathy, A.; Wang, K. (1996). Co-production models with random functionality yields. *IIE Transactions*, Vol. 28, No. 5, pp. 391-403.
- Leachman, R. C.; Gascon, A. (1988). A Heuristic Scheduling Policy for Multi-Item, Single-Machine Production Systems with Time-Varying, Stochastic Demands. *Management Science*, Vol. 34, No. 3, pp. 377-390.
- Nahmias, S.; Moinzadeh, K. (1997). Lot sizing with randomly graded yields. *Operations Research*, Vol. 45, No. 6, pp. 974-986.
- Oner, S.; Bilgic, T. (2008). Economic lot scheduling with uncontrolled co-production. *European Journal of Operational Research*, Vol. 188, No. 3, pp. 793-810.
- Soman, C. A.; Pieter van Donk, D.; Gaalman, G. J. C. (2004a). Comparison of dynamic scheduling policies for hybrid make-to-order and make-to-stock production systems with stochastic demand. *International Journal of Production Economics*, Vol. In Press, Corrected Proof.
- Soman, C. A.; Pieter van Donk, D.; Gaalman, G. J. C. (2004b). Comparison of dynamic scheduling policies for hybrid make-to-order and make-to-stock production systems with stochastic demand. *International Journal of Production Economics*, Vol. In Press, Corrected Proof.
- Sun, H. N.; Huang, H. C.; Jaruphongsa, W. (2010). The economic lot scheduling problem under extended basic period and power-of-two policy. *Optimization Letters*, Vol. 4, No. 2, pp. 157-172.
- Vidal-Carreras, P. I. (2010). Un marco general de diseño de heurísticas para el Problema del Programación del Lote Económico con Coproducción Deliberada y Controlada (DCC-ELSP). *WPOM-Working Papers on Operations Management*, Vol. 1, No. 2.
- Vidal-Carreras, P. I. (2011a). Coproducción: Una revisión de la literatura. *WPOM-Working Papers on Operations Management*, Vol. 2, No. 1, pp. 11-17.
- Vidal-Carreras, P. I. (2011b): *Modelos y métodos para el problema de programación del lote económico con coproducción deliberada y controlada (DCC-ELSP)*, Departamento de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- Wilding, R. (1998). The supply chain complexity triangle: uncertainty generation in the supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, Vol. 28, No. 8, pp. 599-616.