

Simulation of the performance of production strategies for the ELSP under different scenarios of complexity depending on the number of items and utilization

Simulación del comportamiento de estrategias de resolución para el ELSP en diferentes escenarios de complejidad en función del número de artículos y el nivel de utilización

Raúl Cortés-Fibla^a, Pilar I. Vidal-Carreras^b y Jose P. García-Sabater^c

^a Departamento de Organización de empresas, Universidad Politécnica de Valencia, España, Camino de Vera s/n, 46020 Valencia. Email: racorfi@omp.upv.es, ^b Grupo de Investigación ROGLE, Univesitat Politècnica de Valencia, Cno. De Vera s/n, Valencia, Spain. E-mail: pivicar@omp.upv.es and ^c Grupo de Investigación ROGLE, Univesitat Politècnica de Valencia, Cno. De Vera s/n, Valencia, Spain. E-mail: jpgarcia@omp.upv.es

Recibido: 2014-09-02 Aceptado: 2014-12-21

Abstract

This study analyzes the behavior of various production strategies for the ELSP, depending on the context of complexity and uncertainty in which they are used. We analyzed the performance of various heuristics designed for the classical ELSP problem. We evaluated total cost in different scenarios with respect to the number of items and the utilization level. The simulation results show a direct relationship between the performance of the strategies, and therefore their suitability, and the production environment. Furthermore, we have proven that the variation in performance does not follow the same pattern for each strategy, which reinforces the significance of this study in the process of designing a production strategy for the ELSP.

Keywords: ELSP; Complexity; Uncertainty; Simulation; Scheduling

Resumen

Este trabajo analiza el comportamiento de varias estrategias de resolución para el ELSP en función del entorno de complejidad e incertidumbre en el que se emplean. Hemos analizado el rendimiento de varias heurísticas básicas para el problema ELSP clásico. Consideramos el comportamiento del coste en diferentes escenarios con respecto al número de artículos y el nivel de utilización. El resultado de la simulación indica que existe una clara dependencia del rendimiento de las estrategias, y por tanto de la idoneidad de su uso, en relación con las características del problema. Además, demostramos que la variación del rendimiento no sigue el mismo patrón para cada heurística, lo que refuerza la importancia de este estudio en el proceso de diseño de una estrategia de producción

Palabras clave: ELSP; Complejidad; Incertidumbre; Simulación; Secuenciación

Introducción

El problema de programación de lote económico, ELSP, se define formalmente en Bomberger (1966) y consiste en la programación de la producción de varios productos diferentes $i=1..g$ en una única máquina en la que sólo uno producto puede ser producido en cada momento. Desde entonces, son muchas las modificaciones de las condiciones del problema original planteadas en relación con diferentes realidades en la industria. Chan (2013) plantea una revisión reciente de estas modificaciones. En este trabajo, el ELSP modificado tiene las siguientes características:

- Los ratios de producción p_i son deterministas y constantes
- Los ratios de demanda d_i son estocásticos pero deterministas
- Los costes A_i y tiempos de setup c_i , son independientes de la secuencia de producción
- Los costes de inventario h_i son directamente proporcionales a los niveles de stock I_i
- Los retrasos y backorders están permitidos

El estudio del problema se ha centrado habitualmente en la generación de modelos matemáticos para su descripción y en la definición y análisis del comportamiento de dichos procedimientos de resolución, en la mayoría de casos mediante simulación (Winands et al., 2011). Además, siguiendo con el mismo autor, la mayoría de los trabajos se centran en la evaluación u optimización de una clase de estrategias, sin realizar un análisis comparativo con respecto a otras, lo que provoca que las conclusiones de los trabajos planteados se deban ligar a los datos de partida utilizados. En este trabajo pretendemos profundizar en esta cuestión, intentando valorar la influencia de los datos en el comportamiento de los procedimientos de resolución del ELSP. Para valorar esta influencia, consideramos cada conjunto de condiciones de partida en relación con su complejidad e incertidumbre. Por una parte, consideramos la complejidad estructural del problema ELSP, entendida como la dificultad para alcanzar e implementar una solución factible, para una situación concreta del mismo problema en función de los datos de partida (Frizelle, 1996). Por otra, consideramos la incertidumbre de los datos empleados que, como es sabido (Sox et al., 1999), tiene influencia en los resultados. Es importante destacar que la complejidad estructural del problema es un concepto completamente diferente de la complejidad algorítmica del problema matemático ELSP, que es NP-Hard (Hsu, 1983).

Para la variante del problema ELSP definida anteriormente que denominaremos problema marco, existen diversos factores que afectan a la complejidad. Así, es evidente que trabajar con un mayor nº de artículos g añade dificultad al problema marco, ante una situación estable del resto de parámetros del problema (Vaughan, 2007), del mismo modo que el nivel de utilización (Bomberger, 1966; Soman et al., 2006). Así, definimos el nº de ítems y el nivel de utilización como drivers de complejidad que tienen un efecto directo sobre los costes para un mismo problema. Con respecto a la incertidumbre, es habitual que en las situaciones reales, exista incertidumbre o estocasticidad respecto al comportamiento de algunos de los datos a lo largo del horizonte de planificación. Se encuentra por ejemplo estocasticidad en la demanda (Brander and Forsberg, 2006), en el ratio de productos defectuosos (Yao and Huang, 2005) y en el tiempo y coste de setup (Allahverdi et al., 2008). En este trabajo consideramos el comportamiento estocástico de la demanda como driver de incertidumbre.

Este trabajo pretende analizar si existe una relación entre los costes totales obtenidos para la resolución del modelo teórico y los obtenidos mediante simulación para una serie de estrategias de producción. La hipótesis que planteamos es que esa relación, de existir, depende del grado de complejidad y de la incerti-

dumbre en la información de partida en cada caso concreto. Conocer en profundidad dicha relación puede servir por un lado para introducir nuevos elementos de análisis al diseñar los algoritmos de control adecuados para cada versión particular del ELSP. Por otra parte permite predecir el comportamiento de una determinada estrategia de producción y por tanto determinar su grado de idoneidad para la situación concreta en la que va a ser utilizada.

Métodos

Para la simulación hemos evaluado el comportamiento de cuatro estrategias de producción básicas. Para categorizar las estrategias de producción hemos utilizado el criterio de clasificación introducido por Winands et al. (2011), que clasifica las estrategias en función de la política de secuenciación y la política de lotificación. En este sentido, las cuatro estrategias, que llamamos *1a*, *1b*, *2a*, *2b*, utilizan una política lotificación local; es decir, la decisión respecto al tamaño del lote sólo considera el nivel de inventario del artículo que es lanzado. En cuanto a la secuencia de producción, las cuatro estrategias utilizan una secuencia de producción dinámica; es decir, la secuencia en la que se producen los elementos cambia de acuerdo a las condiciones específicas de cada instante.

Concretamente las estrategias *1a* y *1b*, emplean un criterio de secuenciación que denominamos (s, Q) donde s se refiere al stock de reorden y Q al tamaño de lote lanzado a producción. Siempre que el stock de un artículo alcanza su stock s , el artículo está listo para ser lanzado tan pronto como la máquina quede libre. Si varios artículos alcanzan su punto de pedido antes de que la máquina quede libre, una vez se libere se lanzará en primer lugar el artículo con menor ratio de cobertura tal como se define en (1):

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

En cuanto a la política de lotificación, la heurística *1a* utiliza un criterio basado en el tiempo de ciclo calculado mediante solución independiente. Este lote se denominará Q^{IS} , y lo definimos según (2):

$$Q^{IS}_i = d_i T^{IS}_i = \sqrt{\frac{2A_i d_i}{h_i(1-\frac{d_i}{p_i})}} \quad (2)$$

La estrategia *1b*, calcula el tamaño de lote a partir de la técnica de ciclo común. Análogamente denotaremos este lote como Q^{CC} , definido en (3):

$$Q^{CC}_i = d_i T^{CC} = d_i \sqrt{\frac{2 \sum_{i=1}^S A_i}{\sum_{i=1}^S h_i d_i (1-\frac{d_i}{p_i})}} \quad (3)$$

Las estrategias *2a* y *2b*, emplean un criterio de secuenciación que denominamos (s, S) , donde como anteriormente s se refiere al stock de reorden, y S indica el nivel de stock de referencia *order up to level*, para el cálculo del lote a emitir. Análogamente, la estrategia *2a* calcula el *order up to level* S a partir de la solución independiente (S^{IS}), mientras que la estrategia *2b* lo establece a partir de la solución obtenida mediante ciclo común (S^{CC}), según (4) y (5), respectivamente.

$$S^{IS}_i = d_i T^{IS}_i + d_i s_i \quad (4)$$

$$S^{CC}_i = d_i T^{CC} + d_i s_i \quad (5)$$

Tabla 1. Estrategias de Producción

Estrategia	Secuenciación	Lotificación	Stock Inicial (I ₀)	Stock de reorden (s)
1a	Dynamic (s, Q)	Q ^S		
1b	Dynamic (s, Q)	Q ^{CC}		
2a	Dynamic (s, S)	S ^S	$\sum_{n=1}^i \left(c_n + \frac{d_n T_n}{p_n} \right) d_n$	$\left(c_i + \frac{d_i T_i}{p_i} \right) d_i$
2b	Dynamic (s, S)	S ^{CC}		

La Tabla 1 resume las características de las estrategias de producción. Hemos definido el stock inicial de cada artículo de modo que, en una situación de demanda determinista, cada artículo alcanza su stock de reorden s inmediatamente después de que la máquina ha terminado de procesar el elemento anterior en la lista. Así, bajo demanda determinista, la máquina produce consecutivamente los lotes de los elementos sin tiempos de espera entre ellos, y luego espera a que el primer elemento de la lista alcance de nuevo su stock de reorden. Obviamente, en simulaciones con la demanda estocástica, este lanzamiento "sincronizado" no se reproduce exactamente. En cuanto al stock de reorden s , hemos establecido un nivel el stock mínimo necesario para satisfacer la demanda durante el tiempo necesario para llevar a cabo el setup y producir el lote correspondiente bajo demanda determinista.

Modelo

Para evaluar el rendimiento de las heurísticas descritas, hemos desarrollado un modelo de simulación de eventos discretos mediante el software de simulación SIMIO. La arquitectura del modelo está constituida mediante la estructura más simple: Source-Server-Sink.

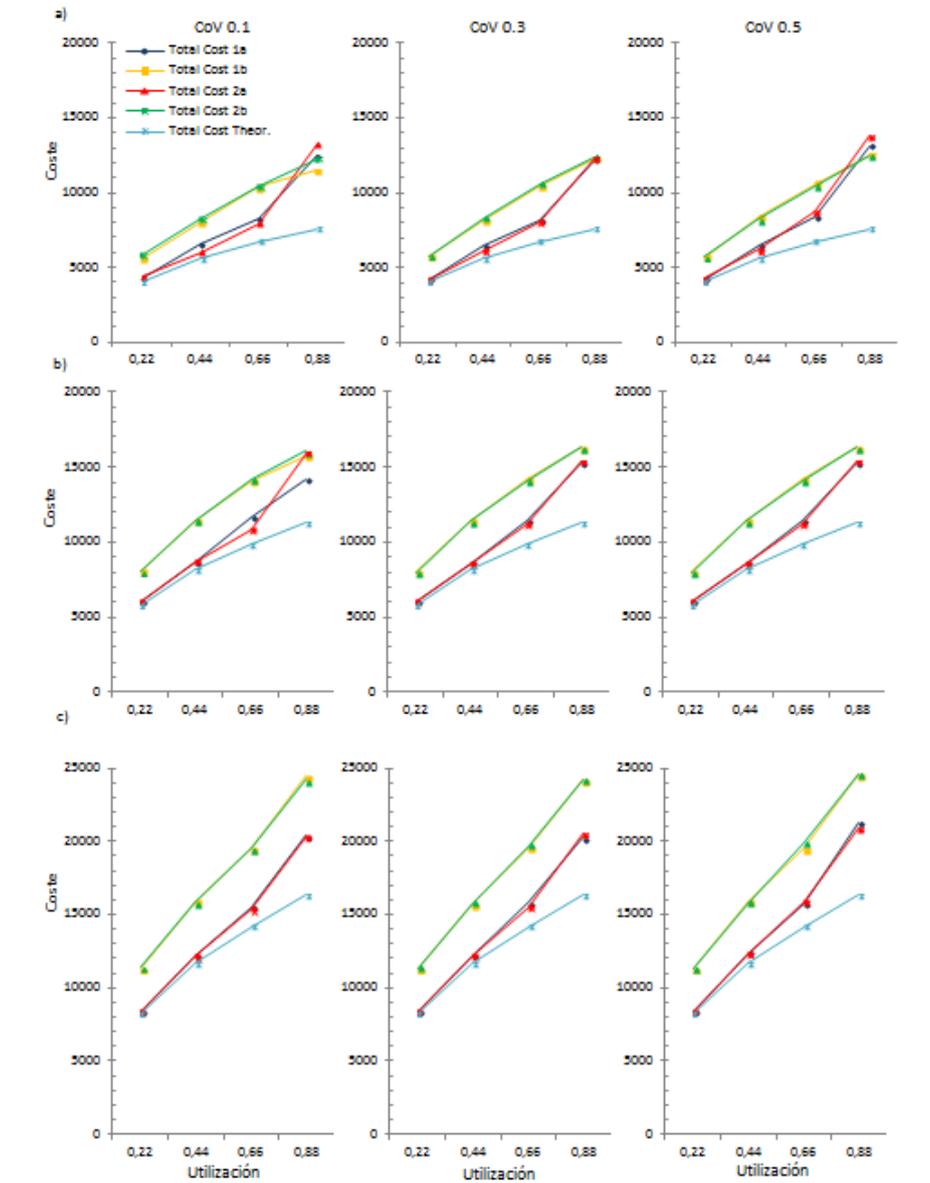
Respecto a los factores experimentales, partiendo del problema básico descrito en Bomberger (1966), hemos construido diferentes conjuntos de datos para 96 casos diferentes del mismo problema marco. Para ello, hemos construido problemas con $g=10, 20, 30$ y 40 artículos, y cuatro niveles de utilización: $0.22, 0.44, 0.66, 0.88$, sin considerar tiempos de setup. Además, para simular el comportamiento estocástico de la demanda, hemos considerado diferentes coeficientes de variación, desde 0 hasta 0.5 con intervalos de 0.1 . Hemos tratado deliberadamente de mantener la misma estructura del problema con $g=10$, manteniendo los mismos ratios de demanda y de producción, los mismo tiempos de setup y los mismos costes de almacenamiento. Para incrementar el número de artículos, decidimos multiplicar el número de artículos por $1, 2, 3$ y 4 partiendo del problema de 10 artículos, y reduciendo la demanda de cada artículo por el mismo factor. Respecto a los costes de rotura de stock y la definición de un stock de seguridad, puesto que el proceso de simulación permite determinar exactamente el nivel máximo de rotura de stock que alcanza cada artículo en todo el horizonte, hemos empleado esta cantidad como stock de seguridad necesario. Mediante este procedimiento, el stock de seguridad se convierte en un factor de coste determinante que refleja la influencia del número de artículos, nivel de utilización e incertidumbre en la demanda, sobre el rendimiento de cada estrategia de producción.

Respecto a la dinámica de la simulación, del mismo modo que en Brander et al (2005), todas las simulaciones tienen lugar durante 960 días de producción, lo que representa 4 años. En nuestros experimentos hemos considerado un tiempo de *warm-up* de 960 días, en el que no se registra ningún valor de coste.

Resultados, análisis y discusión

La figura 1 muestra el comportamiento de las cuatro estrategias descritas, ante ratios de utilización crecientes. Por mantener la claridad de la figura, representamos este comportamiento únicamente para los casos de a) 10 artículos, b) 20 artículos y c) 40 artículos. En la figura se representa también la solución teórica al modelo para la resolución aplicando *SI*, que es una cota inferior. Además se muestra el comportamiento ante diferentes coeficientes de variación de la demanda.

Figura 1. Influencia del ratio de utilización sobre el coste; a) 10 artículos, b) 20 artículos, c) 40 artículos

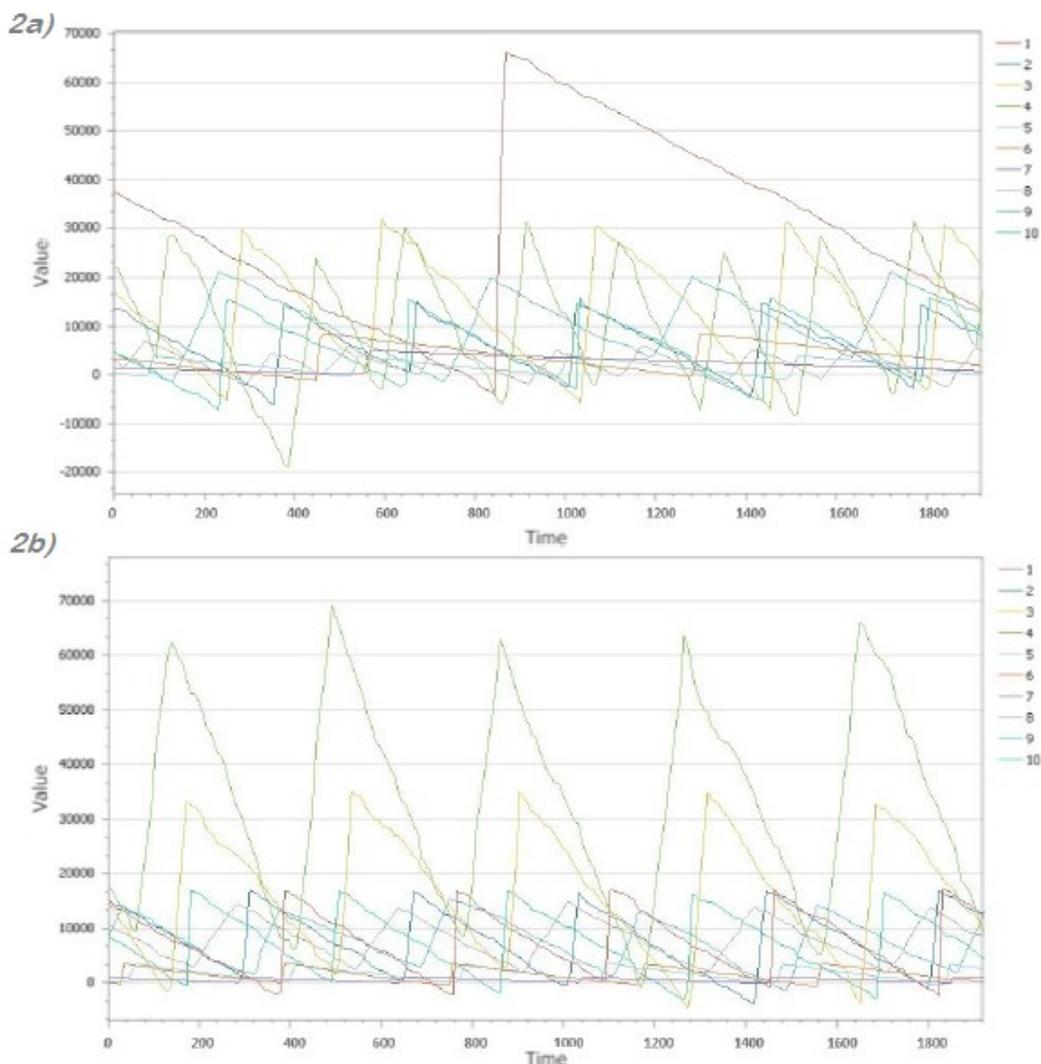


En relación con esto, Bomberger (1966) ya indicó que los costes en relación con la demanda tenían un crecimiento exponencial para las estrategias presentadas, de acuerdo con:

$$TC = \sum_{i=1}^g \sqrt{2A_i h_i d_i \left(1 - \frac{d_i}{p_i}\right)} \quad (6)$$

No sólo se aprecia este incremento de costes, sino que este incremento tiene un patrón de comportamiento diferente en función de la estrategia empleada. De este modo, podemos concluir que mantener la misma estrategia de producción en situaciones con diferentes niveles de utilización sería una decisión equivocada. En particular, como se aprecia en la figura 1, las estrategias basadas en *SI* tiene un buen comportamiento a bajos niveles de utilización, lo cual es lógico porque se basan en la mejor solución para cada artículo. En cambio a mayores niveles de utilización esta solución empieza a ser difícilmente implementable. Esto provocará mayor número de roturas de stock y un mayor stock de seguridad para evitar que se produzcan, lo que hace mucho más convenientes otro tipo de estrategias, como las basadas en *CC*. La figura 2 ilustra este efecto a través de los niveles de inventarios para el último año de simulación (1920 horas) para las estrategias *2a* y *2b*, en el caso de 10 artículos y utilización 0.88.

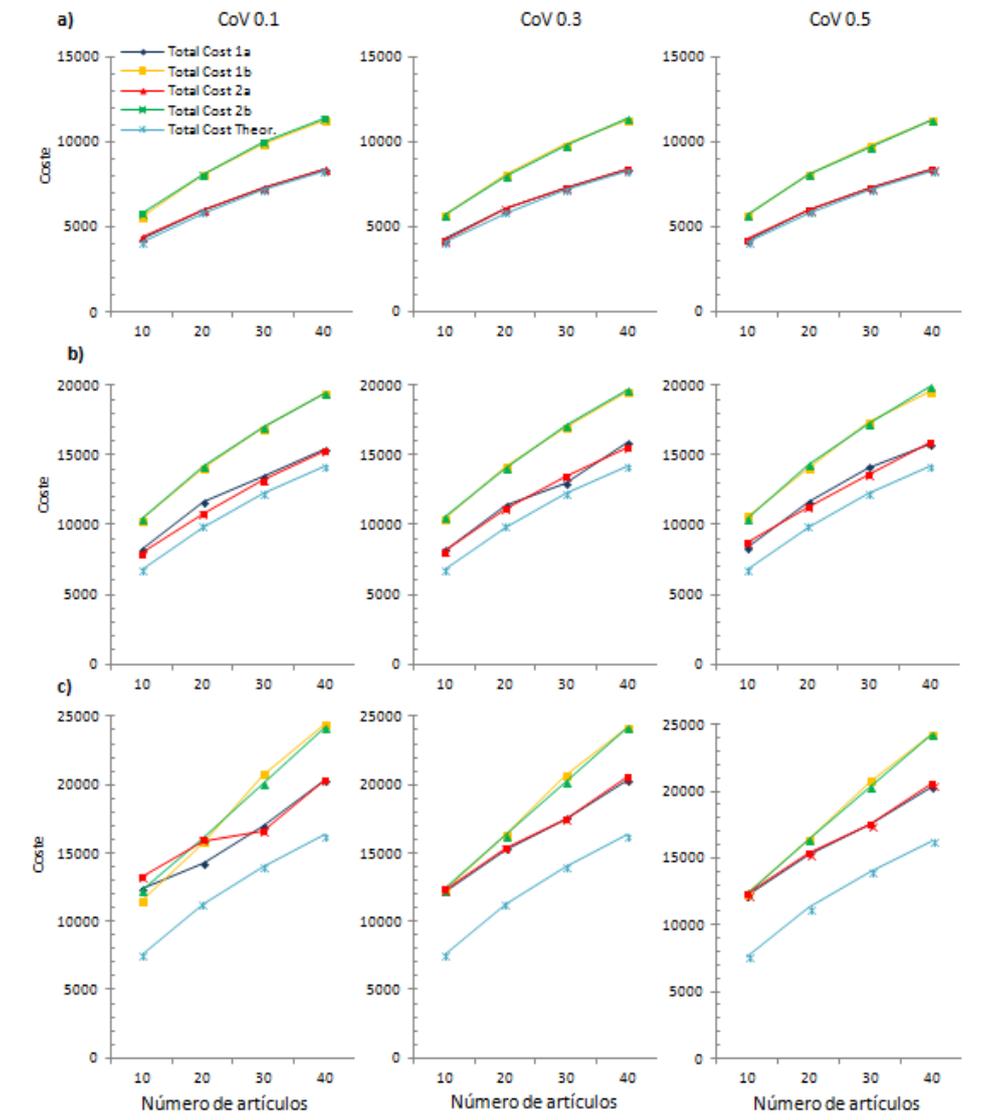
Figura 2. Niveles de inventario por artículo. Estrategias *2a* y *2b*. 10 artículos, utilización 0.88.



En la figura se aprecia la importancia que, particularmente para la estrategia *2a* basada en *SI*, tienen en esta situación de alto nivel de utilización las roturas de stock. Estas roturas de stock derivan en un incremento del coste de esta estrategia, que hace que sea menos conveniente en relación con el coste que la estrategia *2b*, basada en *CC*.

En cuanto al análisis en relación con el incremento del número de artículos, los resultados se muestran en la figura 3.

Figura 3. Influencia del número de artículos sobre el coste. Nivel de utilización a) 0.22, b) 0.66, c) 0.88



De forma similar a como ocurría con el incremento del factor de utilización en (6), ante un incremento del número de artículos g , el coste total también se incrementa. La relación entre los costes para una el problema con único artículo, con ratio de producción p y de demanda d , y los costes para el mismo problema

con g artículos con el mismo ratio de producción y demanda $\frac{d}{g}$, y por tanto con el mismo nivel de utilización, viene dada por (7):

$$TC_{g^*} = CT \sqrt{\frac{g \cdot p - d}{p - d}} \quad (7)$$

La diferencia entre las estrategias $1a$ y $2a$, basadas en SI, respecto a la cota inferior, aumenta con el nivel de utilización. Para un nivel de utilización 0.88, en el caso de 10 artículos, la diferencia se hace tan grande que hace que sea más conveniente el empleo de las estrategias basadas en CC, $1b$ y $2b$. Este efecto no se aprecia para un mayor número de artículos porque hemos trabajado a niveles de utilización fijos sin considerar los tiempos de setup lo que distorsiona el resultado para valores muy altos del número de artículos. Así, mantener una estrategia de producción basada en SI que, para bajos niveles de utilización con pocos artículos tiene un rendimiento aceptable, sería un error para un mayor nivel de utilización. Así pues, como se sugiere en Winands et al. (2011), es fundamental identificar en qué situación una determinada estrategia es efectiva.

De la comparación de las cuatro estrategias planteadas en los diferentes escenarios, se desprende la necesidad de profundizar en este estudio como herramienta de validación de las estrategias de resolución para el ELSP, en función del entorno productivo en el que van a ser utilizadas.

Conclusiones y líneas de futuro

A partir de los resultados de este estudio, hemos probado que el rendimiento de una estrategia de producción ELSP varía de acuerdo con el conjunto de datos de cada caso particular a la que se aplica. El hecho de que una estrategia de producción obtenga un menor coste total de una determinada situación no garantiza que la misma estrategia siga siendo mejor en otras condiciones específicas del mismo problema. Esta conclusión es absolutamente relevante para aplicaciones industriales en los problemas relacionados con el ELSP donde las condiciones pueden cambiar por completo, incluso en la misma instalación, por ejemplo en condiciones de demanda estacional. Así, las conclusiones de un estudio realizado utilizando un conjunto de datos específicos no pueden aplicarse con garantías, o incluso pueden provocar resultados contrarios a los esperados, cuando se aplica en diferentes condiciones de producción. En esta línea, pretendemos ampliar este estudio de dos maneras diferentes. Por un lado, pretendemos demostrar que este análisis presenta resultados similares al aplicarse a otras estrategias de producción presentadas en la literatura, cuyo rendimiento ha sido analizado en relación con otras estrategias, pero no de acuerdo con la complejidad del escenario en estudio. Por otro lado, pretendemos introducir otros drivers de complejidad e incertidumbre en el análisis, como los mencionados en la introducción. Las variantes del problema objeto de estudio (diferentes problemas marco) introducen nuevos drivers de complejidad. Otras variantes del problema que introducen nuevos drivers de complejidad son, por ejemplo, la consideración de estacionalidad de la demanda, tiempos de setup dependientes de la secuencia, o ratios de producción variables, entre otros. En cuanto a la incertidumbre, y como se mencionó en la introducción, teniendo en cuenta el ELSP clásico, aparte de la demanda, los tiempos de proceso o los tiempos de setup pueden mostrar un comportamiento estocástico, lo que introduce incertidumbre en el problema. También la consideración de averías o la disponibilidad de las existencias introducirían nuevos drivers de la incertidumbre. En esta línea,

pretendemos ampliar el análisis realizado en este trabajo considerando de nuevos drivers de complejidad e incertidumbre.

Referencias

- Allahverdi, A.; Ng, C. T.; Cheng, T. C. E.; Kovalyov, M. Y. (2008). A survey of scheduling problems with setup times or costs. *European Journal of Operational Research*, Vol. 187, No. 3, pp. 985-1032.
- Bomberger, E. E. (1966). A dynamic programming approach to a lot size scheduling problem. *Management Science*, Vol. 12, No. 11, p. 778.
- Brander, P.; Forsberg, R. (2006). Determination of safety stocks for cyclic schedules with stochastic demands. *International Journal of Production Economics*, Vol. 104, No. 2, pp. 271-295.
- Brander, P.; Leven, E.; Segerstedt, A. (2005). Lot sizes in a capacity constrained facility - a simulation study of stationary stochastic demand. *International Journal of Production Economics*, Vol. 93-94, pp. 375-386.
- Chan, H. K.; Chung, S. H.; Lim, M. K. (2013). Recent research trend of economic-lot scheduling problems. *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 24, No. 3, pp. 465-482.
- Frizelle, G. D. M. (1996). Getting the measure of complexity. *Manufacturing Engineer*, Vol. 75, No. 6, pp. 268-270.
- Hsu, W. L. (1983). On the General Feasibility Test of Scheduling Lot Sizes for Several Products on One Machine. *Management Science*, Vol. 29, No. 1, pp. 93-105.
- Magee, J. F.; Boodman, D. M. (1967). *Production Planning and inventory control*, Second ed. McGraw Hill
- Soman, C. A.; Pieter van Donk, D.; Gaalman, G. (2006). Comparison of dynamic scheduling policies for hybrid make-to-order and make-to-stock production systems with stochastic demand. *International Journal of Production Economics*, Vol. 104, No. 2, pp. 441-453.
- Sox, C. R.; Jackson, P. L.; Bowman, A.; Muckstadt, J. A. (1999). A review of the stochastic lot scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, Vol. 62, No. 3, pp. 181-200.
- Vaughan, T. S. (2007). Cyclical schedules vs. dynamic sequencing: Replenishment dynamics and inventory efficiency. *International Journal of Production Economics*, Vol. 107, No. 2, pp. 518-527.
- Vergin, R. C.; Lee, T. N. (1978). Scheduling Rules for Multiple Product Single Machine System with Stochastic Demand. *Infor*, Vol. 16, No. 1, pp. 64-73.
- Winands, E. M. M.; Adan, I. J. B. F.; van Houtum, G. J. (2011). The stochastic economic lot scheduling problem: A survey. *European Journal of Operational Research*, Vol. 210, No. 1, pp. 1-9.
- Yao, M. J.; Huang, J. X. (2005). Solving the economic lot scheduling problem with deteriorating items using genetic algorithms. *Journal of Food Engineering*, Vol. 70, No. 3, pp. 309-322.