

El Problema de la Programación del Lote Económico (ELSP): Una revisión de la literatura

Pilar Isabel Vidal Carreras¹, José Pedro García Sabater¹

¹ Dpto. de Organización de Empresas. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia
pivicar@omp.upv.es, jpgarcia@omp.upv.es

Resumen

En este trabajo se pretende realizar una revisión de la extensa literatura existente en torno al problema de programación del lote económico (ELSP) que consiste básicamente en el problema de acomodar patrones de producción cíclica cuando varios productos se han de realizar en una única máquina (multiproducto y unimáquina). De este modo se considera adecuado realizar inicialmente una descripción básica del problema. A continuación y como resultado del análisis de la ardua literatura existente, se propone una clasificación que pretende considerar nuevos factores que afectan a la complejidad del problema y que intentar aproximarse más a la realidad industrial.

Palabras clave: ELSP, Tamaño de Lote, Secuencia, Factores

1. Descripción del problema

El problema de acuerdo con la descripción que aparece en Bomberger (1966) consiste en la programación de la producción de varios productos diferentes en una única máquina. Esto implica que los ítems $i = 1, 2, \dots, N$ se produzcan en lotes que se repiten cada cierto tiempo. Las características relevantes del sistema son las siguientes:

- Los ratios de producción son deterministas y constantes (p_i)
- Los costes y tiempos de setup S_i, A_i son independientes de la secuencia de producción
- La demanda debe ser satisfecha en el periodo en el que ocurre ($r_i; p_i > r_i$)
- Los costes de inventario h_i son directamente proporcionales a los niveles de stock
- La capacidad de producción es suficiente para alcanzar la demanda total

El programa factible que se obtiene como solución debe conseguir que la suma de los setups y los costes de inventario de todos los productos por unidad de tiempo sea la mínima posible.

Se define T_i como el tiempo de ciclo de cada producto. El tiempo de ciclo es el tiempo que transcurre entre el comienzo de dos producciones sucesivas del ítem i . El problema del ELSP es justamente encontrar **ciclos de tiempo factibles** para los cuales la media de los costes por unidad de tiempo (C) de producir los N ítems sea minimizada. El coste a minimizar es igual a $\sum_i C_i$ donde C_i es el coste medio por unidad de tiempo para producir el producto i y viene dado por; $C_i = A_i/T_i + h_i r_i (1 - b_i) T_i / 2$.

2. Una Propuesta de clasificación

A raíz del análisis de los diversos artículos que se han podido obtener de la extensa bibliografía relacionada con el problema de Programación del Lote Económico (*ELSP*), se han identificado los factores que resultan especialmente relevantes en el análisis del problema. Así, teniendo en cuenta todos estos factores y los estados del arte previos del problema publicados Elmaghraby (1978); Lopez y Kingsman (1991) para el *ELSP*, Karimi et al. (2003) para el *ELSP* con restricciones de capacidad (*CLSP*) etc. se establece la siguiente clasificación del problema *ELSP* (Figura 1) :

a.	Según el modo de cálculo del lote:
a.1.	Solución Independiente (Independent Solution)
a.2.	Método del Ciclo Común (Common-Cycle-Approach)
a.3.	Método del Período Básico (Basic-Period-Approach)
a.4.	Método del Período Básico Extendido (Basic-Period-Extended-Approach)
a.5.	Método de Modificación de los Tamaños de Lote (Varying-Lot-Sizes-Approach)
b.	Según la tipología del método de resolución:
b.1.	Analíticos
b.2.	Heurísticos
c.	Según el objeto del problema:
c.1.	Determinar el Tiempo de Ciclo o Frecuencia (Tamaño de Lote)
c.2.	Determinar la Secuencia Productiva
c.3.	Determinar el Tiempo de Ciclo y la Secuencia Productiva
d.	Tipo de Estudio abordado en el problema:
d.1.	Complejidad del Problema
d.2.	Optimalidad del Problema
d.3.	Análisis de Sensibilidad
e.	Realización de aplicaciones numéricas en el desarrollo de la argumentación. Empleo o creación de Benchmark.
f.	Evaluación de diversas heurísticas mediante simulación.
g.	Modificación de parámetros dados.
g.1.	Ratio de Producción
g.2.	Set-up

Figura 1. Propuesta de Clasificación del *ELSP*

A continuación se desarrolla esta clasificación propuesta.

6. Según el modo de cálculo del lote

El enfoque más elemental del *ELSP* es garantizar la factibilidad del subconjunto imponiendo varias restricciones en los tiempos de ciclo, para optimizar las duraciones de los ciclos individuales sujetos a restricciones impuestas. La solución obtenida de este modo es factible y óptima para este conjunto de soluciones. Así es posible encontrar cinco métodos con diferentes suposiciones restrictivas en la literatura, que se describen a continuación y cuyas principales referencias se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 . Principales referencias según el tipo de método

Solución Independiente	Eilon (1957), Rogers (1958), Mallya (1992)
Solución Independiente + Ciclo Común	Madigan (1968), Gallego (1990)
Ciclo Común	Hanssmann, F. 1962, Jones y Inman (1989), Hwang et al. (1993), Ben-Daya y Hariga (2000), Khoury et al. (2001), Eynan (2003)
Periodo Básico	Stankard y Gupta (1969), Doll y Whybark (1973), Haessler y Hogue S.L (1976), Schweitzer y Silver (1983), Hsu (1983) Leachman y Gascon (1988), Davis (1990), Hahm y Yano (1995), Tunasar y Rajgopal (1996), Goyal (1997), Khouja et al. (1998), Soman et al. (2004b)
Periodo Básico Extendido	Elmaghraby (1978b), Haessler (1979)
Ciclo Común + Variación del Tamaño de Lote	Moon et al. (1998), Moon et al. (2002a), Giri et al. (2003)
Periodo Básico + Variación del Tamaño de lote	Carstensen (1999)
Variación del Tamaño de lote	Maxwell (1964), Delporte y Thomas (1977), Zipkin (1991) Gallego y Roundy (1992), Gallego y Shaw (1997), Moon et al. (2002b)

6.1. Solución Independiente (*Independent Solution*)

Este procedimiento consiste en el cálculo del tamaño de lote de cada producto de manera aislada a partir de la fórmula del tamaño de lote económico (EOQ). Se denomina independiente ya que ignora la casuística de que varios productos puedan ser producidos en la misma máquina, algo que implicaría compartir la capacidad de esta. De esta forma el valor obtenido con este método es siempre una cota inferior en el cálculo del coste mínimo del problema. Sin embargo, esta solución es raramente factible por el hecho de considerar cada producto de manera aislada. Considerando el ítem i de modo aislado, el valor de C_i se minimiza cuando el tamaño de lote es T_i que aparece en la siguiente fórmula (1):

$$T_i^* = \sqrt{2A_i/h_i r_i (1-b_i)} \quad (1)$$

6.2. Método del Ciclo Común (*Common-Cycle-Approach*)

Este método fue propuesto por Hanssmann (1962) y se basa en asumir una longitud de ciclo suficiente para acomodar la producción de cada producto exactamente una vez en cada ciclo, siendo el tamaño de ciclo de todos los productos iguales por lo que $T_1 = T_2 = \dots = T_N = T^*$. De este modo el objetivo es determinar el valor óptimo de T^* .

6.3. Método del Período Básico (*Basic-Period-Approach*)

El método consiste en admitir diferentes ciclos para cada uno de los productos pero insistiendo en que cada T_i , debe de ser un múltiplo entero del periodo básico que se denomina "W" y es la longitud suficiente para acomodar la producción de todos los productos. Este método fue propuesto por Bomberger (1966), y redescubierta por Dobson (1987) y Gallego y Moon (1992). En el método del período básico (BP), se permite variación de ciclos $T_i = n_i W$, donde n_i es un multiplicador entero.

6.4. Método del periodo básico extendido (Basic-Period-Extended-Approach)

Elmaghraby (1978) propone este método que es una extensión del método de Bomberger. Se asume un periodo básico W y se representa el tiempo de ciclo mediante múltiplos enteros de W . La diferencia es que se consideran dos periodos básicos consecutivos cada uno de duración W y se carga los ítems en esos dos periodos básicos. Haciendo esto, la restricción de factibilidad del PB se relaja. El método del PBE domina claramente al método del PB en la calidad de la solución pero requiere un mayor esfuerzo en el desarrollo de la misma.

6.5. Método de modificación de los tamaños de lote (Varying-Lot-Sizes-Approach)

Permite distintos tamaños de lote para cualquier producto durante un programa cíclico. Considera explícitamente los tiempos de setup y siempre da una solución factible, tal y como se demuestra en Dobson (1987). Normalmente da mejores soluciones que los anteriores.

7. Según la tipología del método de resolución

Es posible clasificar los métodos en dos grandes categorías, cuyas principales referencias encontradas en la literatura se muestran en la Tabla 2.

- I. Métodos analíticos que consiguen el óptimo de una versión limitada del problema original.
- II. Métodos que alcanzan “buenas” (algunas veces “muy buenas”) soluciones del problema original.

Tabla 2. Según la tipología del método de resolución

Analíticos Puros	Bomberger, E. E. (1966), Dobson, G. (1987), Jones, P. C. et al. (1989), Roundy (1989), Silver (1990), Gallego, G. (1990), Davis, S. G. (1990), Hwang, H. et al. (1993), Hahm, J. et al. (1995), Gallego, G. et al. (1997), Eiamkanchanalai y Banerjee (1999), Ben-Daya, M. et al. (2000), Khoury, B. N. et al. (2001), Moon, I. et al. (2002a), Giri, B. C. et al. (2003), Eynan, A. (2003), Larsen (2005)
Heurísticos Puros	Maxwell, W. L. (1964), Madigan, J. G. (1968), Stankard, M. F. et al. (1969), Doll, C. L. et al. (1973), Haessler, R. W. et al. (1976), Haessler, R. W. (1979), Tunasar, Rajgopal, J. (1996), Goyal, S. K. (1997)
Planteamiento y resolución de un método analítico y comparación con una heurística	Karmarkar y Schrage (1985) Zipkin, P. H. (1991) Carstensen, P. (1999) Kimms (1999) Moon, I. et al. (2002a) Sarker y Newton (2002)
Planteamiento de un método analítico pero resolución con una heurística	Rogers, J. (1958) Delporte, C. M. et al. (1977) Elmaghraby (1978c) Dobson, G. (1987) Campbell y Mabert (1991) Moon, I. K. et al. (1998) Khouja (2000) Cooke et al. (2004) Yao y Elmaghraby (2001) Moon, I. et al. (2002b) Yao y Huang (2005)

7. Según el Objeto del Problema. Secuencia y/o Tiempo de Ciclo.

El problema completo del ELSP incluye el establecimiento de la secuencia de fabricación de los distintos ítems (*scheduling*) y la determinación de la cantidad a producir de cada uno de ellos, es decir el cálculo del tamaño de lote (*lot sizing*). Tal y como se ha señalado en el apartado de conceptos básicos del problema ELSP, el tamaño de lote del producto i se puede expresar del siguiente modo (2):

$$q_i = r_i T_i \quad (2)$$

Siendo, r_i , el ratio de demanda en unidades por unidad de tiempo y T_i , el tiempo de ciclo. De esto modo, sabiendo que la demanda en el problema clásico es conocida y determinista, es posible afirmar que resulta equivalente el cálculo del tamaño de lote y el cálculo del tiempo de ciclo T_i , o la frecuencia de producción del producto η_i ($\eta_i = 1/T_i$).

Sin embargo, en la literatura el número de referencias relacionadas con el problema de la búsqueda de nuevos métodos para el cálculo del tamaño de ciclo óptimo es considerablemente superior al número de referencias cuyo objetivo es mostrar nuevos modos de establecer la secuencia productiva. Así una de las primeras reglas de secuenciación se atribuye a Delporte, C. M. et al. (1977) que establece una serie de heurísticas para el establecimiento del orden de fabricación de los distintos items. Dobson (1987) incluye en su estudio otra heurística de secuenciación empleada por diversos autores Gallego et al. (1992), Zipkin (1991). Sin embargo, una de las regla de secuenciación más sencillas y más empleada por diversos autores lo largo del tiempo Brander et al. (2005), Brander y Forsberg (2004), Gascon et al. (1994), Leachman et al. (1988), Soman et al. (2004a), Soman et al. (2004b), Vergin y Lee (1978) es la planteada por Segerstedt (1999) que se basa en el *Run Out* ($RO_i = I_i/r_i$, con I_i el inventario del producto i).

7. Tipo de Estudio abordado en el problema

En la literatura se han encontrado dos artículos que se dedican al estudio de la **complejidad del problema**. En primer lugar Hsu (1983) muestra que incluso una versión muy restrictiva del problema original ELSP se convierte en NP-hard. En su estudio también aparece un procedimiento de enumeración implícita para testear la factibilidad. En segundo lugar Gallego et al. (1997) muestran como el ELSP es NP-duro en sentido estricto bajo programas generales cíclicos, programas cíclicos con cero inventarios, programas cíclicos con tiempos invariantes y programas cíclicos con periodos básicos.

Por otro lado, en los distintos algoritmos tanto analíticos como heurísticos propuestos por diversos autores, se plantea en algunos casos una **condición de optimalidad** AlFawzan y AlSultan (1997), Bourland y Yano (1997), Carstensen, P. (1999), Cooke et al. (2004), Eynan (2003), Gallego et al. (1992), Hahm et al. (1995), Jones et al. (1989), Khoury et al. (2001), Kimms (1999), Larsen (2005), Sarker et al. (2002), Schweitzer et al. (1983) de la solución mientras que en otros se plantea una **condición de factibilidad** Bomberger (1966), Davis (1990), Dobson, (1987), Doll et al. (1973), Elmaghraby (1978), Goyal (1997), Haessler et al. (1976), Hanssmann (1962), Hsu (1983), Madigan (1968), Tunasar, Rajgopal (1996), Vemuganti (1978), Yao et al. (2005).

7. Realización de aplicaciones numéricas en el desarrollo de la argumentación. Empleo o creación de Benchmark.

La mayor parte de las propuestas tanto analíticas como heurísticas relacionadas con el problema de programación del lote económico son evaluadas mediante datos experimentales. En algunos de estos artículos se proponen conjuntos de datos estableciendo lo que comúnmente se denomina *benchmarks* Ben-Daya et al. (2000), Bomberger (1966), Eilon, S. (1957), Johson y Montgomery (1974), Mallya (1992), Rogers (1958), Silver (1990), Silver, Pyke y Peterson (1998), Yao et al. (2001). De esta forma se permite que otros autores hagan

referencias a estos “juegos de datos” o *benchmarks* durante el desarrollo de sus chequeos. Realmente esta es la situación más habitual, estos *benchmarks*, en su estado puro o ligeramente modificados, son empleados por los diversos autores como punto de referencia en la comparación de los resultados de sus algoritmos.

7. Evaluación de diversas heurísticas mediante simulación.

Se puede distinguir una tipología de artículo que consiste en la evaluación de diversas heurísticas conocidas a través de simulación, modificando alguna característica básica del problema ELSP. En algunos casos se repiten las heurísticas testeadas en los diferentes artículos Bomberger (1966), Doll et al. (1973), Fransoo et al. (1995), Segerstedt (1999), Vergin et al. (1978). En la siguiente Tabla 3 se muestra una clasificación de las simulaciones de heurísticas encontradas en la literatura, se puede observar como en todas se ha modificado la característica clásica de la demanda determinista.

Tabla 3. Evaluación de Heurísticas mediante Simulación

Demanda Estocástica	Vergin, R. C. et al. (1978)	Make to stock
	Leachman, R. C. et al. (1988)	PB, Make to stock
	Gascon, A. et al. (1994)	Make to stock
	Brander, P. et al. (2004)	MTL, Tiempo ocioso
	Soman, C. A. et al. (2004a)	Make to stock – Make to order
Demanda Estocástica estacionaria	Brander, P. et al. (2005)	MTL, Tiempo Ocioso, Back Orders, 4 productos

6. Modificación de parámetros dados.

Se plantea una clasificación general de las aportaciones que se han podido encontrar en la revisión de la literatura, que se apoya de la variable principal que puede ser modificada. Aparecen dos grandes grupos: aquellos en los que el ratio de producción se puede modificar y aquellos en los que se modifican conceptos relacionados con el setup, ver Tabla 4.

Tabla 4. Modificaciones de parámetros dados

Modificaciones Parámetros Dados	Ratio de Producción	-	Allen (1990)
		Instalaciones con baja utilización	Silver, E. A. (1990) Moon et al. (1991) Gallego (1993) Khouja (1997) Moon y Christy (1998)
		Shelf Life	Viswanathan y Goyal (1997), Silver (1995) Viswanathan y Goyal (2002)
	Set up	Costes de Setup e Inventario	Gallego, G. et al. (1992)
		Tiempos de Setup	Gallego y Moon (1995)
		Setup y Calidad	Hwang, H. et al. (1993) Moon (1994)
		Estabilización del periodo	Moon, I. K. et al. (1998)

7. Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto una clasificación que considera factores nuevos que no aparecían en los estados del arte de los que se disponía. Se han encontrado multitud de referencias que no consideran las condiciones clásicas del ELSP, ya que se intentan aproximar más a la realidad industrial y que ofrecen interesantes líneas de investigación.

Referencias

- AlFawzan, M. A.; AlSultan, K. S. (1997). Economic production quantity for a manufacturing system with a controllable production rate. *Production Planning & Control*, Vol. 8, No. 7, pp. 678-685.
- Allen, S. J. (1990). Production rate planning for two products sharing a single process facility: a real world case study. *Production and Inventory Management*, Vol. 31, pp. 24-29.
- Ben-Daya, M.; Hariga, M. (2000). Economic lot scheduling problem with imperfect production processes. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, No. 7, pp. 875-881.
- Bomberger, E. E. (1966). A dynamic programming approach to a lot size scheduling problem. *Management Science (Pre-1986)*, Vol. 12, No. 11, pp. 778.
- Bourland, K. E.; Yano, C. A. (1997). A comparison of solution approaches for the fixed-sequence economic lot scheduling problem. *IIE Transactions*, Vol. 29, No. 2, pp. 103-108.
- Brander, P.; Forsberg, R. (2004). Determination of safety stocks for cyclic schedules with stochastic demands. *International Journal of Production Economics*, Vol. In Press, Corrected Proof.
- 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.
- Campbell, G. M.; Mabert, V. A. (1991). Cyclical Schedules for capacited lot sizing with dynamic demands. *Management Science*, Vol. 37, No. 4, pp. 409-427.
- Carstensen, P. (1999). The economic lot scheduling problem - survey and LP-based method. *Or Spektrum*, Vol. 21, No. 4, pp. 429-460.
- Cooke, D. L.; Rohleder, T. R.; Silver, E. A. (2004). Finding effective schedules for the economic lot scheduling problem: A simple mixed integer programming approach. *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 1, pp. 21-36.
- Davis, S. G. (1990). Scheduling Economic Lot Size Production-Runs. *Management Science*, Vol. 36, No. 8, pp. 985-998.
- Delporte, C. M.; Thomas, L. J. (1977). Lot Sizing and Sequencing for N-Products on One Facility. *Management Science*, Vol. 23, No. 10, pp. 1070-1079.
- Dobson, G. (1987). The Economic Lot-Scheduling Problem - Achieving Feasibility Using Time-Varying Lot Sizes. *Operations Research*, Vol. 35, No. 5, pp. 764-771.
- Doll, C. L.; Whybark, D. C. (1973). An iterative procedure for the single-machine multi-product lot scheduling problem. *Management Science*, Vol. 20, No. 1, pp. 50-55.
- Eiamkanchanalai, S.; Banerjee, A. (1999). Production lot sizing with variable production rate and explicit idle capacity cost. *International Journal of Production Economics*, Vol. 59, No. 1-3, pp. 251-259.
- Eilon, S. (1957). Scheduling for batch production. *Journal of Institute of Production Engineering*, Vol. 36, pp. 549-579.
- Elmaghraby, S. E. (1978). The economic lot scheduling problem (ELSP): Review and extensions. *Management Science*, Vol. 24, No. 6, pp. 587-598.

- Eynan, A. (2003). The benefits of flexible production rates in the economic lot scheduling problem. *IIE Transactions*, Vol. 35, No. 11, pp. 1057-1064.
- 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.
- Gallego, G. (1993). Reduced Production-Rates in the Economic Lot Scheduling Problem. *International Journal of Production Research*, Vol. 31, No. 5, pp. 1035-1046.
- Gallego, G. (1990). Scheduling the Production of Several Items with Random Demands in A Single Facility. *Management Science*, Vol. 36, No. 12, pp. 1579-1592.
- Gallego, G.; Moon, I. (1995). Strategic Investment to Reduce Setup Times in the Economic Lot Scheduling Problem. *Naval Research Logistics*, Vol. 42, No. 5, pp. 773-790.
- Gallego, G.; Moon, I. (1992). The Effect of Externalizing Setups in the Economic Lot Scheduling Problem. *Operations Research*, Vol. 40, No. 3, pp. 614-619.
- Gallego, G.; Roundy, R. (1992). The Economic Lot Scheduling Problem with Finite Backorder Costs. *Naval Research Logistics*, Vol. 39, No. 5, pp. 729-739.
- Gallego, G.; Shaw, D. X. (1997). Complexity of the ELSP with general cyclic schedules. *IIE Transactions*, Vol. 29, No. 2, pp. 109-113.
- 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.
- Giri, B. C.; Moon, I.; Yun, W. Y. (2003). Scheduling economic lot sizes in deteriorating production systems. *Naval Research Logistics*, Vol. 50, No. 6, pp. 650-661.
- Goyal, S. K. (1997). Observation on the economic lot scheduling problem: Theory and practice. *International Journal of Production Economics*, Vol. 50, No. 1, pp. 61.
- Haessler, R. W. (1979). Improved Extended Basic Period Procedure for Solving the Economic Lot Scheduling Problem. *AIIE Transactions*, Vol. 11, No. 4, pp. 336-340.
- Haessler, R. W.; Hogue S.L (1976). A note on the single-machine multi-product lot scheduling problem. *Management Science*, Vol. 22, No. 8, pp. 909-912.
- Hahm, J.; Yano, C. A. (1995). The Economic Lot and Delivery Scheduling Problem - Powers of 2 Policies. *Transportation Science*, Vol. 29, No. 3, pp. 222-241.
- Hanssmann, F. 1962. *Operations-Research in Production and Inventory Control*. New York.
- 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.
- Hwang, H.; Kim, D. B.; Kim, Y. D. (1993). Multiproduct Economic Lot Size Models with Investment Costs for Setup Reduction and Quality Improvement. *International Journal of Production Research*, Vol. 31, No. 3, pp. 691-703.
- Johson, L. & Montgomery, D. 1974. *Operations Research in Production Planning, Scheduling and Inventory Control*. New York: John Wiley and Sons.
- Jones, P. C.; Inman, R. R. (1989). When Is the Economic Lot Scheduling Problem Easy. *IIE Transactions*, Vol. 21, No. 1, pp. 11-20.
- Karmarkar, U. S.; Schrage, L. (1985). The Deterministic Dynamic Product Cycling Problem. *Operations Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 326-345.
- Khouja, M. (1997). The scheduling of economic lot sizes on volume flexible production systems. *International Journal of Production Economics*, Vol. 48, No. 1, pp. 73-86.
- Khouja, M. (2000). The economic lot and delivery scheduling problem: common cycle, rework, and variable production rate. *IIE Transactions*, Vol. 32, No. 8, pp. 715-725.
- Khouja, M.; Michalewicz, Z.; Wilmot, M. (1998). The use of genetic algorithms to solve the economic lot size scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 110, No. 3, pp. 509-524.

- Khoury, B. N.; Abboud, N. E.; Tannous, M. M. (2001). The common cycle approach to the ELSP problem with insufficient capacity. *International Journal of Production Economics*, Vol. 73, No. 2, pp. 189-199.
- Kimms, A. (1999). A genetic algorithm for multi-level, multi-machine lot sizing and scheduling. *Computers & Operations Research*, Vol. 26, No. 8, pp. 829-848.
- Larsen, C. (2005). The economic production lot size model extended to include more than one production rate. *International Transactions in Operational Research*, Vol. 12, pp. 339-353.
- 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.
- Madigan, J. G. (1968). Scheduling A Multi-Product Single Machine System for An Infinite Planning Period. *Management Science*, Vol. 14, No. 11, pp. 713-719.
- Mallya, R. (1992). Multiproduct Scheduling on A Single-Machine - A Case-Study. *Omega-International Journal of Management Science*, Vol. 20, No. 4, pp. 529-534.
- Maxwell, W. L. (1964). Scheduling of Economic Lot Sizes. *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 11, No. 2-3, pp. 89-&.
- Moon, D. H.; Christy, D. P. (1998). Determination of optimal production rates on a single facility with dependent mold lifespan. *International Journal of Production Economics*, Vol. 54, No. 1, pp. 29-40.
- Moon, I. (1994). Multiproduct Economic Lot-Size Models with Investment Costs for Setup Reduction and Quality Improvement - Review and Extensions. *International Journal of Production Research*, Vol. 32, No. 12, pp. 2795-2801.
- Moon, I.; Gallego, G.; Simchilevi, D. (1991). Controllable Production-Rates in A Family Production Context. *International Journal of Production Research*, Vol. 29, No. 12, pp. 2459-2470.
- Moon, I.; Giri, B.; Choi, K. (2002a). Economic lot scheduling problem with imperfect production processes and setup times. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, No. 6, pp. 620-629.
- Moon, I.; Silver, E. A.; Choi, S. (2002b). Hybrid genetic algorithm for the economic lot-scheduling problem. *International Journal of Production Research*, Vol. 40, No. 4, pp. 809-824.
- Moon, I. K.; Hahm, J. H.; Lee, C. (1998). The effect of the stabilization period on the economic lot scheduling problem. *IIE Transactions*, Vol. 30, No. 11, pp. 1009-1017.
- Rogers, J. (1958). A Computational Approach to the Economic Lot Scheduling Problem. *Management Science*, Vol. 4, No. 3, pp. 264-291.
- Roundy, R. (1989). Rounding Off to Powers of 2 in Continuous Relaxations of Capacitated Lot Sizing Problems. *Management Science*, Vol. 35, No. 12, pp. 1433-1442.
- Sarker, R.; Newton, C. (2002). A genetic algorithm for solving economic lot size scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 42, No. 2-4, pp. 189-198.
- Schweitzer, P. J.; Silver, E. A. (1983). Mathematical Pitfalls in the One Machine Multiproduct Economic Lot Scheduling Problem. *Operations Research*, Vol. 31, No. 2, pp. 401-405.
- Segerstedt, A. (1999). Lot sizes in a capacity constrained facility with available initial inventories. *International Journal of Production Economics*, Vol. 59, No. 1-3, pp. 469-475.
- Silver, E. A. (1990). Deliberately Slowing Down Output in A Family Production Context. *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 1, pp. 17-27.
- Silver, E. A. (1995). Dealing with A Shelf-Life Constraint in Cyclic Scheduling by Adjusting Both Cycle Time and Production-Rate. *International Journal of Production Research*, Vol. 33, No. 3, pp. 623-629.

- Silver, E. A., Pyke, D., & Peterson, R. 1998. *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. New York: Wiley.
- 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., van Donk, D. P., and Gaalman, G. J. C. Heuristics for multi-item, single machine scheduling problem with stochastic demand revisited. Working Paper and University of Groningen. 2004b.
- Soman, C. A.; van Donk, D. P.; Gaalman, G. J. C. (2004b). A basic period approach to the economic lot scheduling problem with shelf life considerations. *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 8, pp. 1677-1689.
- Stankard, M. F.; Gupta, S. K. (1969). A note on Bomberger's approach to lot size scheduling: Heuristic proposed. *Management Science Series A-Theory*, Vol. 15, No. 7, pp. 449-452.
- Tunasar, C. and Rajgopal, J. An evolutionary computation approach to the economic lot scheduling problem. Working Paper Vol. Department of Industrial Engineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh. 1996.
- Vemuganti, R. R. (1978). Feasibility of Scheduling Lot Sizes for 2 Products on One Machine. *Management Science*, Vol. 24, No. 15, pp. 1668-1673.
- 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.
- Viswanathan, S.; Goyal, S. K. (1997). Optimal cycle time and production rate in a family production context with shelf life considerations. *International Journal of Production Research*, Vol. 35, No. 6, pp. 1703-1711.
- Viswanathan, S.; Goyal, S. K. (2002). On 'Manufacturing batch size and ordering policy for products with shelf lives'. *International Journal of Production Research*, Vol. 40, No. 8, pp. 1965-1970.
- Yao, M. J.; Elmaghraby, S. E. (2001). The economic lot scheduling problem under power-of-two policy. *Computers & Mathematics With Applications*, Vol. 41, No. 10-11, pp. 1379-1393.
- 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.
- Zipkin, P. H. (1991). Computing Optimal Lot Sizes in the Economic Lot Scheduling Problem. *Operations Research*, Vol. 39, No. 1, pp. 56-63.