

Sistemas de Ayuda a la Toma de Decisiones en Planificación Jerárquica de la Producción. Propuesta de Descomposición Jerárquica de un Modelo de Planificación/Programación de la Producción con elevados Tiempos de Setup. Aplicación a una Empresa del Sector Cerámico.

Maria del Mar Eva Alemany¹, Carlos Andrés², Eduardo Vicens³

¹Ingeniero Industrial. Grupo de Investigación en Gestión en Ingeniería de Producción. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia. mareva@omp.upv.es

²Doctor Ingeniero Industrial. Grupo de Investigación en Gestión en Ingeniería de Producción. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia. candres@omp.upv.es

³Doctor Ingeniero Industrial. Grupo de Investigación en Gestión en Ingeniería de Producción. Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia. evicens@omp.upv.es

RESUMEN

La presente comunicación expone la investigación llevada a cabo en el marco de una tesis doctoral en desarrollo relacionada con la Planificación Jerárquica de la Producción (PJP) en empresas del sector de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos. Se propone la realización de la planificación/programación de la producción en varios niveles a partir de la descomposición jerárquica de un modelo detallado, de manera que para cada nivel se establece un modelo matemático de ayuda a la toma de decisiones. La configuración productiva en este tipo de sistemas puede considerarse formada por varios talleres de flujo híbridos, con la existencia de elevados tiempos de cambio de partida en algunas de las etapas. Estas dos características junto con otras descritas posteriormente, hace que los modelos planteados presenten ciertos aspectos diferenciadores con respecto a los encontrados en la literatura.

1. Introducción.

A la hora de abordar el tema de la Planificación de la Producción en el ámbito empresarial se han propuesto potentes modelos de optimización por medio de la programación matemática ([1], [2], [3]). Sin embargo, el resultado obtenido [4] es, en muchas ocasiones, un modelo monolítico (detallado) difícil de optimizar e interpretar como una entidad única. A este inconveniente se unen el gran esfuerzo necesario para recopilar y actualizar los datos para los modelos monolíticos, la dificultad de resolución de los programas enteros-mixtos de gran tamaño así como su hipótesis acerca de una toma de decisiones centralizada, despreciando las estructuras organizativas establecidas. Todas estas características obstruyen la aplicabilidad de este tipo de modelos.

Una visión clásica para abordar estas dificultades de implementación es la Planificación Jerárquica de la Producción (PJP), filosofía iniciada por Hax y Meal [5]. En un sistema de planificación jerárquica [6], la toma de decisiones se lleva a cabo de una manera secuencial. En primer lugar se realizan las decisiones agregadas que imponen una serie de restricciones a las decisiones más detalladas. Por otro lado, las decisiones detalladas proporcionan la necesaria realimentación para evaluar la calidad de la toma de decisiones agregada. Cada nivel jerárquico presenta sus propias características; longitud del horizonte de planificación, nivel de detalle de la información y de las previsiones de demanda, alcance de la actividad de planificación, y el/los decisores encargados de ejecutar el plan.

Han sido varias las aplicaciones de la filosofía PJP en la literatura (ver [7]). Éstas intentan aprovechar las ventajas fundamentales de la visión jerárquica aplicada a problemas complejos: reducción de la complejidad, tratamiento de la incertidumbre, paralelismo con la organización jerárquica de la empresa, mejora de la visión general de los decisores debido a la utilización de entidades agregadas, necesidad reducida de información detallada y posibilidad de obtener unas previsiones más fiables [8]. Sin embargo, han sido pocas las aplicaciones de la PJP al sector de pavimentos y revestimientos cerámicos ([9], [10], [11]). En este trabajo de investigación, a partir de la descomposición de un modelo detallado se plantea una jerarquía de modelos para la ayuda a la toma de decisiones en planificación/programación de la producción en el Sector Cerámico.

La comunicación se encuentra estructurada de la siguiente forma. En primer lugar, se describe el entorno productivo objeto de estudio y posteriormente se plantea la problemática que se pretende abordar. A continuación se exponen las principales características de la jerarquía planteada y, para terminar, se establecen una serie de consideraciones finales.

2. Descripción del entorno productivo.

En el proceso de fabricación de gres se puede hablar de dos tipos de procesos, monococción y bicocción. En ambos procesos, la fabricación del revestimiento cerámico se realiza a partir de arcillas que una vez atomizada se prensa, formando unas piezas, que en el caso de bicocción se cuecen antes de ser esmaltadas (bizcocho), luego se esmalta y sufre una segunda cocción (fino), y en monococción directamente pasan a esmaltarse. A continuación, sea cual sea el proceso, el producto esmaltado pasa al horno. Entre las líneas de esmaltado y los hornos existen almacenes intermedios debido al distinto ritmo de producción que hay en cada sección. Una vez cocido el producto, éste se transporta a una zona de almacenamiento a la espera de ser clasificado en diferentes calidades por medio de máquinas sofisticadas. Al mismo tiempo, un operario analiza los defectos de superficie. La propia máquina de selección confecciona las cajas de cartón en las que se envasa el producto. Un robot recoge estas cajas y las almacena en los palets que se transportan al almacén de producto acabado, quedando listo para su expedición.

En el caso de la empresa objeto de estudio, el proceso de monococción quedaría integrado por las prensas 1-4, líneas de esmaltado 1-4, hornos 1-2 y clasificadoras/embaladoras 1-3. Con respecto al proceso de bicocción, éste estaría compuesto por la prensa 5, horno 3, líneas 5 y 6, horno 4 y clasificadoras/embaladoras 4-5 (Figura 1).

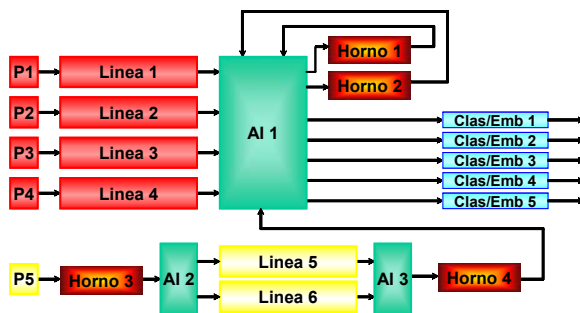


Figura 1: Configuración Física del Sistema Productivo de la Empresa objeto de Estudio

En cada tipo de proceso productivo se pueden distinguir varios tipos de formatos (tamaño). A su vez, cada formato posee diferentes modelos que serán función de la forma y de las aplicaciones que reciben (dibujos, esmaltes, etc) en las líneas de esmaltado.

3. Descripción de la problemática a resolver.

A efectos de planificación y programación de la producción, aquellos recursos en los que no existe posibilidad de alterar el orden de paso pueden considerarse como un único recurso. Así, en la configuración productiva descrita anteriormente (Figura 1) se tiene que:

- El conjunto formado por prensas, secaderos, volteadoras y líneas de engobe y esmaltado debido a que se encuentran conectados entre sí por una cinta transportadora, constituyen un solo recurso.
- Las secciones de clasificado y embalado al encontrarse también unidas por una cinta transportadora, serán consideradas como una máquina o recurso único.
- Se considerará cada horno como una máquina o recurso independiente.

Si dentro de un mismo proceso se agrupan aquellas máquinas con la misma función se tienen diferentes etapas entre las que existen zonas de almacenamiento intermedias con capacidad finita compartidas por diferentes etapas. De esta manera, si se consideran tantas copias de los almacenes como etapas los utilizan, el flujo lógico de los productos vendría representado por el mostrado en la Figura 2. En ella se observa, claramente, que tanto la línea de proceso de monococción como la de bicocción presentan una estructura de Taller de Flujo Híbrido con tres y cuatro etapas, respectivamente.

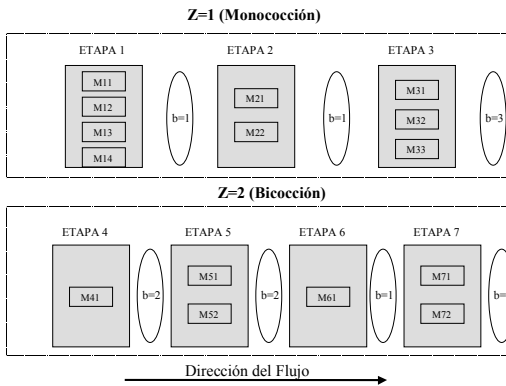


Figura 2: Flujo lógico de los productos.

En [12] se define el taller de flujo híbrido como una configuración de máquinas organizadas en r secciones o etapas donde se procesan una serie de n piezas. Cada pieza recibe como máximo r operaciones (una en cada etapa o sección). Una sección contiene un conjunto de m_r recursos (máquinas) susceptibles de ejecutar una misma operación, estos son equivalentes en cuanto a su funcionamiento aunque pueden no serlo en su eficiencia debido a que la duración de una operación puede depender del recurso elegido dentro de una sección. Las máquinas solamente pueden procesar un único trabajo a la vez y cada producto recibe una única operación por etapa. El flujo de los trabajos es unidireccional desde la etapa 1 a la r .

El problema de decisión a resolver en este tipo de Sistemas Productivos consiste en determinar qué Artículos se producen en cada Máquina (Asignación) y en qué cantidad (Lotificación) para satisfacer la Demanda Dinámica conocida con certidumbre sobre un Horizonte de Planificación dado. Este Problema se ha denominado tradicionalmente [13] “Problema de Lotificación y Asignación con Restricciones de Capacidad (Capacitated Lot Sizing and Loading Problem; CLSLP)”.

Para resolver el problema planteado se propone un Modelo Detallado (cuya descomposición jerárquica se muestra posteriormente) que puede clasificarse como un CLSLP, pero que presenta una serie de características diferenciadoras del resto de Modelos. Las características principales del Modelo se describen a continuación, haciendo hincapié en aquellos aspectos que resultan más novedosos.

Según el flujo lógico de los productos en la planta éstos se clasifican en distintas líneas de producto. Se considera que el conjunto de etapas por las que pasa cada línea de producto es un taller de flujo híbrido, puesto que todos los productos pertenecientes a una misma línea presentan la misma secuencia de operaciones. Sin embargo, el tratamiento independiente de cada Taller de Flujo Híbrido no es posible debido a la existencia de recursos compartidos por ellos. Aparece aquí, por tanto, el primer aspecto diferenciador del resto de modelos: no se trata un solo taller de flujo híbrido sino de una planta con diversos talleres de flujo híbridos que comparten una serie de recursos comunes.

La Asignación y Lotificación debe realizarse de manera que se respeten los límites de capacidad disponible de los diferentes tipos de recursos. Se supone la existencia de dos tipos de recursos; Recursos dedicados a la Fabricación propiamente dicha y propios de cada taller de flujo y Recursos encargados de los Cambios de Partida compartidos entre los diferentes talleres.

Dentro de los Recursos dedicados a la Fabricación propiamente dicha, se distinguen dos clases de recursos en función de las decisiones de capacidad que sobre ellos se pueden tomar. En los primeros, las decisiones de capacidad se limitan a activar o desactivar el recurso en un periodo (tal es el caso de los hornos). Es decir, una vez activado lo estaría ininterrumpidamente (la máxima capacidad en un periodo). En el segundo tipo, las decisiones de capacidad de los recursos incluyen la posibilidad no sólo de realizar Horas Extra, sino también de elegir el Número de Turnos a realizar en cada Periodo (éste sería el caso del resto de etapas).

El consumo de capacidad de los Recursos encargados de los Cambios de Partida tiene lugar siempre que se produce un cambio de partida en una máquina. Se supondrá que existe una capacidad limitada fija de este tipo de recursos.

Por tanto, la aportación del modelo en este sentido es múltiple: no sólo se distingue entre horas normales y extra, sino que se dimensiona la capacidad normal de un recurso. La capacidad normal de un recurso se controla mediante el número de turnos (mayor o menor capacidad normal) o bien mediante la decisión de activación/desactivación (dotación o no de capacidad normal). Por otro lado se introduce la necesidad de cierto nivel de mano de obra para la realización de los cambios de partida.

La mayoría de modelos empleados para la planificación a medio plazo (modelos con periodos de tiempo grandes) consideran únicamente decisiones sobre lotificación. Sin embargo, en el

sistema de fabricación bajo estudio los cambios de partida pueden llegar a ser muy elevados y por tanto juegan un papel crítico a la hora de alcanzar una cierta eficiencia. Es por ello, que, en este tipo de sistemas no sólo resulta importante conocer el tamaño de lote sino también la asignación de la producción de dicho lote a un procesador específico para, de esta forma, estimar las necesidades de capacidad de una manera más realista. Además esta estimación del consumo de capacidad adquiere mayor importancia cuando se deben tomar decisiones sobre el dimensionado de la capacidad (tal y como se ha descrito anteriormente).

Al nivel de detalle considerado por el modelo, la secuencia se desconoce. Sin embargo, existen unos tiempos de cambio de partida dependientes de la secuencia muy importantes. Con el objetivo de no sobreestimar la capacidad disponible en la realización de planes que luego podrían resultar infactibles al nivel de planta, se ha realizado una estimación de los mismos independiente de la secuencia. El método para llevar a cabo dicha estimación presupone una cierta forma de secuenciación a través de la definición de una jerarquía de productos en artículos, familias, tipos y líneas de producto (descrita en la sección 3.1). En un determinado periodo todos los artículos de la misma familia asignados a la misma máquina se fabrican conjuntamente. Lo mismo sucede con todas las familias pertenecientes al mismo tipo. Por tanto, este tratamiento especial de los cambios de partida también supone un aspecto diferenciador del resto de modelos. En la formulación del modelo detallado aparecen tipos, familias, y artículos. Este tratamiento podría parecer contradictorio porque junto con el término detallado aparece el término agregado (referencias). Esto se realiza así para poder modelizar correctamente los cambios de partida dependientes de la secuencia en un modelo que no la considera.

El modelo considera restricciones sobre tamaños de lote mínimos; en este tipo de industrias existen etapas donde la preparación de una máquina para producir un determinado artículo exige la producción de una cantidad mínima del mismo. Ello es debido a los ajustes necesarios hasta conseguir los efectos deseados en las líneas de esmaltado.

El modelo también considera una de las formas de actuación llevadas a cabo por este tipo de empresas: la mayoración de los tamaños de lote debido a la incertidumbre en el porcentaje de defectuosos durante el proceso de fabricación de un determinado lote.

Las etapas de fabricación se encuentran desacopladas por almacenes cuya capacidad finita se debe respetar en todo momento. Con esta restricción se trata de controlar uno de los principales problemas con los que se encuentran diversas industrias (entre ellas la industria de pavimentos y revestimientos cerámicos): una inversión en inventarios muy elevada.

Finalmente, además de la propia capacidad interna de la empresa, existe la posibilidad de subcontratar artículos finales como una fuente más de capacidad (ilimitada).

4. Propuesta de descomposición jerárquica del modelo detallado. Aplicación a una empresa del sector cerámico.

4.1 Niveles jerárquicos y tipos de agregación.

Debido a los inconvenientes inherentes a los modelos monolíticos (descritos en la sección 1), se establece una descomposición jerárquica del modelo detallado en cuatro niveles; nivel de Líneas de Producto, nivel de Tipos de Producto, nivel de Familias de Producto y nivel de Artículos. El paso del nivel de Artículos al nivel de Familias y del nivel de Familias al de

Tipos, contempla únicamente la agregación de referencias, mientras que el paso del nivel de Tipos al de Líneas considera la agregación de referencias, recursos y tiempo simultáneamente.

Con respecto a la agregación de referencias se establecen cuatro niveles de agrupación:

- Líneas de Productos: conjunto de tipos de producto que pasan por las mismas etapas en el mismo orden.
- Tipos: conjunto de familias de producto con un mismo tamaño o formato y que comparten una fabricación común en cuanto al coste de preparación de las máquinas o elementos de producción (en este caso en prensas).
- Familias: conjunto de artículos que comparten una fabricación común en cuanto al costo de preparación de las máquinas o elementos de producción (en las líneas de esmaltado). Así pueden obtenerse economías de escala, al reponer conjuntamente varios artículos de una misma de estas familias.
- Artículos: son los distintos productos que hay que suministrar a los clientes y representan el más alto grado de especificidad (cada uno de los diferentes modelos de azulejos). A diferencia de la visión tradicional, el tiempo de cambio entre artículos de la misma familia puede no ser despreciable.

La agregación de recursos presenta dos niveles:

- Máquina: recurso capaz de procesar un conjunto de referencias.
- Etapa: conjunto de máquinas capaces de realizar la misma operación sobre el mismo conjunto de referencias pudiendo llevarla a cabo con diferentes tiempos de procesamiento y de cambio de partida.

La agregación temporal se produce únicamente al pasar del nivel de tipos al de líneas, de manera que el periodo agregado definido al nivel de líneas debe estar formado por un número entero y constante de periodos del nivel de tipos.

4.2 Características de cada nivel jerárquico.

Los diferentes niveles jerárquicos no sólo se diferencian en el grado de abstracción con el que tratan las diversas entidades sino también en su correspondiente instante de toma de decisiones: así las decisiones sobre capacidad a medio plazo (propia (horas extra, número de turnos) y subcontratada) debe realizarse con cierto tiempo de antelación sobre las decisiones de dotación de capacidad a corto plazo (horas extra desagregadas, activación/desactivación de máquinas), y éstas previamente a cualquier decisión sobre producción. Debido a este desfase temporal en la toma de decisiones de cada nivel, a diferencia de la visión tradicional, los niveles inferiores al nivel de líneas y al nivel de tipos no proporcionan el inventario inicial a estos otros niveles, sino que éste se trata como una decisión propia de cada uno de ellos.

De la misma manera las decisiones, que se consideran en cada uno de ellos son diferentes (Tabla 2). Algunas de ellas son propias del nivel, no siendo sometidas a una posterior desagregación (por ejemplo, número de turnos establecido por el nivel de líneas). Otras por el contrario, tendrán que ser desagregadas por los niveles inferiores (como las cantidades de producción planificadas de grupos de referencias), dando lugar a las denominadas ecuaciones de consistencia en la desagregación. Los objetivos y restricciones considerados en cada uno de los niveles son los que aparecen en la Tabla 3.

Nivel	Decisiones
Líneas de Producto	<ul style="list-style-type: none"> - Niveles planificados de inventario agregado de Líneas de Producto. - Cantidad de producción planificada de Líneas de Producto. - Cantidad a subcontratar planificada de Líneas de Producto. - Número de Turnos para etapas diferentes de las etapas de hornos. - Número de HE agregado para etapas diferentes de las etapas de hornos.
Tipos	<ul style="list-style-type: none"> - Niveles planificados de inventario agregado de Tipos de Producto. - Cantidad de producción planificada de Tipos de Producto. - Asignación de Tipos a Máquinas y tamaño de lotes de Tipos. - Horas extra a realizar por cada máquina diferente de hornos en cada periodo de tiempo. - Activación/desactivación hornos.
Familias	<ul style="list-style-type: none"> - Asignación de Familias a Máquinas y tamaño de lotes de familias.
Artículos	<ul style="list-style-type: none"> - Producción planificada de cada artículo en cada etapa y en cada máquina (Asignación y Lotificación de Artículos en las máquinas de cada etapa).

Tabla 2: Decisiones consideradas en cada uno de los niveles jerárquicos.

Nivel	Objetivos	Restricciones
Líneas de Producto	<ul style="list-style-type: none"> - Minimización Costes de Producción - Minimización Costes de Subcontratación - Minimización Costes de Inventario de producto en curso y acabado. - Minimización Costes de HN (horas normales) - Minimización de Costes de HE, (horas extra), (etapas diferentes de hornos) - Minimización Costes del NT (número de turnos) y de variación del NT (etapas diferentes de hornos). 	<ul style="list-style-type: none"> - Limitación de capacidad normal y extra - Ecuación de balance del inventario - Ecuación de continuidad relacionada con el número de turnos - Limitaciones sobre el SS. - Limitaciones de almacenamiento - Limitaciones de capacidad de la mano de obra encargada de cambios de partida
Tipos	<ul style="list-style-type: none"> - Minimización de Costes de Inventario - Minimización Costes de Preparación de Tipos en Máquinas - Minimización de Costes de Mantener Activas las máquinas pertenecientes a sección de hornos - Minimización de los Costes derivados de la Activación/Desactivación de las máquinas pertenecientes a la sección de hornos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Limitación de capacidad normal y extra - Ecuación de balance del inventario - Ecuación de continuidad sobre activación/desactivación de las máquinas pertenecientes a sección de hornos. - Limitaciones sobre el SS. - Limitaciones sobre tamaños de lote mínimo. - Limitaciones de almacenamiento - Limitaciones de capacidad de la mano de obra encargada de los cambios de partida. - Ecuaciones de consistencia en la desagregación (ECD).
Familias	<ul style="list-style-type: none"> - Minimización de Costes de Almacenamiento - Minimización de Costes de Preparación de Familias (incluyendo artículos) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ecuación de continuidad del inventario - Limitación sobre coherencia de asignación de familias y tipos. - Limitación sobre tamaños de lote mínimos - ECD.
Artículos	<ul style="list-style-type: none"> - Igualación de los Tiempos de Agotamiento - Igualación de la probabilidad de diferir demanda en el periodo cubierto. - Minimizar desviaciones con respecto a las decisiones de los niveles superiores 	<ul style="list-style-type: none"> - Ecuación de balance del inventario - Limitación sobre asignación de artículos. - Limitación sobre tamaños de lote mínimos. - Limitación capacidad máquinas y mano de obra encargada de los cambios de partida. - ECD (restricciones objetivo)

Tabla 3: Objetivos y restricciones en cada uno de los niveles jerárquicos.

5. Consideraciones finales.

Se ha planteado una jerarquía de modelos para la ayuda en la toma de decisiones en planificación/programación de la producción en industrias del sector cerámico. Este tipo de industrias presentan elevados tiempos de cambio de partida a la hora de fabricar los distintos productos de su creciente catálogo. Aunque tradicionalmente el consumo de capacidad de las máquinas ocasionado por los cambios de partida se ha considerado a un nivel más detallado, la importancia de los mismos en este tipo de empresas hace necesaria su tratamiento incluso a niveles agregados (nivel de tipos). De esta manera, las estimaciones sobre la capacidad necesaria son más realistas, con la consiguiente mejora en el dimensionado de la capacidad disponible en las diferentes etapas (establecimiento de número de turnos, horas extra, activación/desactivación de hornos, subcontratación, etc.). A través de la jerarquía propuesta no sólo se contemplan ciertas características propias del sector cerámico (tamaños de lote

mínimos, capacidad finita de almacenes, etc.) sino que también se establece una concordancia entre los niveles planteados y el instante de tiempo en el que se establecen ciertas decisiones.

Referencias

- [1] Manne A.S., (1958) "Programming economic lot sizes", *Management Science*, 4, pp. 114-135.
- [2] Dzielinski B.P. y Gomory R.E., (1965) "Optimal programming of lot sizes inventory and labor allocations", *Management Science*, 11, pp. 874-890.
- [3] Lasdon, L.S. y Tertunj, R.C., (1971) "An efficient algorithm for multi-item scheduling", *Operations Research*, 19, pp. 946-969.
- [4] Shapiro J.F. (1993), "Mathematical Programming Models and Methods for Production Planning and Scheduling", In: S.C. Graves (eds.), *Handbooks in OR&MS*, Elsevier Science Publishers B.V., 4, pp. 523-568.
- [5] Hax A.C. y Meal H.C., (1975), "Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling" in *Studies in the Management Sciences*, M. A. Geisler eds. Logistics, North Holland, American Elsevier.
- [6] Bitran G.R. y Hax A.C., (1977) "On the design of hierarchical production planning systems", *Decision Sciences*, 8, pp. 28-55.
- [7] Vicens E., Alemany M.E., Andrés C. y Guarch J.J., (2001), "A Design and Application Methodology for Hierarchical Production Planning Decision Support System in an Enterprise Integration Context.", *International Journal of Production Economics*, 74, pp.5-20.
- [8] Nagi R. y Proth J.-M. (1994), "Hierarchical Production Management. Modern Manufacturing", In: Zaremba and Prasad (eds.), *Information Control and Technology*, Springer-Verlag, Berlin, 6, pp. 132-172.
- [9] Liberatore J.M. y Miller T. (1985), "A Hierarchical Production Planning System", *Interfaces*, 5, pp. 1-11
- [10] Özdamar L., Bozyel M.A. y Birbil S.I. (1998), "A Hierarchical Decision Support System for Production Planning (with case study)", *European Journal of Operational Research*, 104, pp. 403-422.
- [11] Özdamar L. y Birbil S.I., (1999). "A hierarchical planning system for energy intensive production environments", *International Journal of Production Economics*, 58, pp. 115-129.
- [12] Riane F., Artiba A. y Elmaghraby S.E., (1998) "A hybrid three-stage flowshop problem: efficient heuristics to minimize makespan", *European Journal of Operational Research*, 109, pp. 321-329.
- [13] Özdamar L. y Birbil S.I., (1998), "Hybrid Heuristics for the capacitated lot sizing and loading problem with setup times and overtime decisions", *European Journal of Operational Research*, 110, pp. 525-547.