

Programación de trabajos en células con máquinas reconfigurables mediante modelos lineales basados en el mTSP

Ignacio Eguía¹, Jesús Racero¹, José Manuel García¹

¹ Dpto de Organización Industrial y Gestión de empresas. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos, s/n. 41020 Sevilla. ies@us.es , jrm@us.es , jmgs@esi.us.es

Palabras clave: Modelos lineales, Secuenciación, Fabricación celular, Fabricación reconfigurable.

1. Introducción

La situación actual de los mercados es bastante impredecible, debido a la implantación de una economía globalizada, en la que existe un alto nivel de competitividad. Además, está sujeta a cambios de diversa naturaleza, relacionados con la variedad y el volumen de los productos demandados, con las nuevas regulaciones medioambientales por parte de los gobiernos y con las continuas innovaciones en las tecnologías de fabricación que dejan obsoletos en poco tiempo los sistemas de producción. Todo ello se traduce en productos con: ciclos de vida más corta, más innovadores, respetuosos con el medioambiente, personalizados al cliente y en volúmenes de tamaño dinámicos.

Para sobrevivir en este nuevo entorno, las empresas deben ser capaces de reaccionar ante estos cambios de forma rápida a un bajo coste, adaptándose a las ventanas de oportunidad que vayan creándose. La búsqueda de nuevos sistemas que permitan diseñar, planificar y programar la producción de una forma más eficiente es de trascendental importancia para el buen progreso de la economía, ya que la industria es uno de los pilares en los que se sustentan la creación de riqueza y la creación de más y mejores trabajos.

Los paradigmas tradicionales como los sistemas de fabricación dedicados (SFD) o los sistemas de fabricación flexibles (SFF), van dejando paso a nuevos paradigmas de fabricación como los sistemas de fabricación reconfigurable (SFR) o las células virtuales de fabricación (CVF). La variedad de productos que se empieza a demandar en el último cuarto del siglo pasado obligó a las empresas que tenían sistemas de producción en masa (SFD) a introducir cierta flexibilidad mediante el uso de la Tecnología de Grupos, que se basa en la agrupación de productos con características similares en familias, diseñando las instalaciones para una producción en masa de dichas familias (Sistemas de Fabricación Celulares). En respuesta a las necesidades de cambios respecto a las capacidades de producción, surgen a finales del siglo pasado los SFF, que evolucionan de los sistemas celulares hacia el diseño y construcción de instalaciones capaces de realizar una amplia variedad de operaciones de fabricación. La adaptación de los sistemas flexibles a cambios continuos en la variedad y cantidad de productos que requiere las condiciones actuales de mercado (producción personalizada), tiene como consecuencias un escaso uso de los equipos instalados y un alto coste de inversión (Koren et al. (1999)).

Una técnica que surge para adaptar las instalaciones de fabricación a las necesidades de los consumidores, a una producción personalizada, es la “personalización en masa” (Svensson y Barfod (2002)). Esta técnica tiene como objetivo fabricar grandes cantidades de productos personalizados, de una forma rápida, a bajo coste y con alta calidad. Por tanto, se le exige a los sistemas de fabricación que sean capaces de fabricar una amplia gama de productos en cantidades medias, no tan grandes como los que usan los sistemas de fabricación en masa.

Es considerada como una de las grandes estrategias de fabricación y su implementación requiere de la atención de las distintas y complejas elecciones de los clientes en cada momento (variedad de productos), economía de escala (eficiencia en masa) y gran flexibilidad (rápida adaptabilidad) en los procesos de fabricación. Está guiando el desarrollo e implementación de los nuevos sistemas de fabricación en las próximas décadas, en lo que se conoce como Sistemas de Fabricación de Nueva Generación (Next-Generation Manufacturing Systems, NGMS).

Los NGMS deben responder de forma rápida a los cambios continuos en la demanda de productos de forma efectiva en costes (Lei et al. (1998)). La entrega rápida de productos personalizados al cliente en cantidades variables, obligará a los sistemas de fabricación a usar nuevas tecnologías que incorporen flexibilidad, reconfigurabilidad e inteligencia (Molina et al. (2005)). En este sentido, los SFR han surgido en los últimos años para afrontar estos retos.

Los SFR se diseñan de forma modular para dotar a los sistemas de producción de capacidad y funcionalidad adicional de forma rápida y a bajo coste. Esto permite mejorar la productividad del sistema de fabricación cuando existen fluctuaciones en la demanda. En paralelo a los SFR, surgen las CVF como alternativa a los tradicionales sistemas de fabricación celulares (SFC) donde los recursos son agrupados en células para fabricar familias de productos similares entre sí. Las CVF mejoran esa carencia de flexibilidad de los SFC tradicionales pues las células de fabricación no son estáticas sino que pueden variar de forma dinámica en función de los requisitos de la demanda. La incorporación de algunas características de los sistemas de fabricación reconfigurable (SFR) y de las células virtuales de fabricación (CVF) dentro de sus actuales sistemas de producción, aportarían a las empresas de producción soluciones factibles y eficientes en costes a los problemas de planificación y control de la producción en entornos dinámicos como el que nos encontramos.

Únicamente se dispone de una investigación reciente que estudia la formación de células tradicionales cuando existen máquinas reconfigurables (Pattanaik et al. (2007)). En dicho artículo se plantea un método de agrupación de máquinas en células considerando que las máquinas son modulares, y en base a dos objetivos: minimizar los movimientos intercelulares de los productos y los cambios de módulos necesarios según unas demandas establecidas. En dicho artículo no se incluyen costes de operación ni se asignan secuencias de operaciones a las células.

En el presente trabajo se presenta una metodología para abordar conjuntamente el diseño de células y la programación de trabajos en empresas que utilicen máquinas reconfigurables. Para ello se divide la metodología en varias etapas (figura 1):

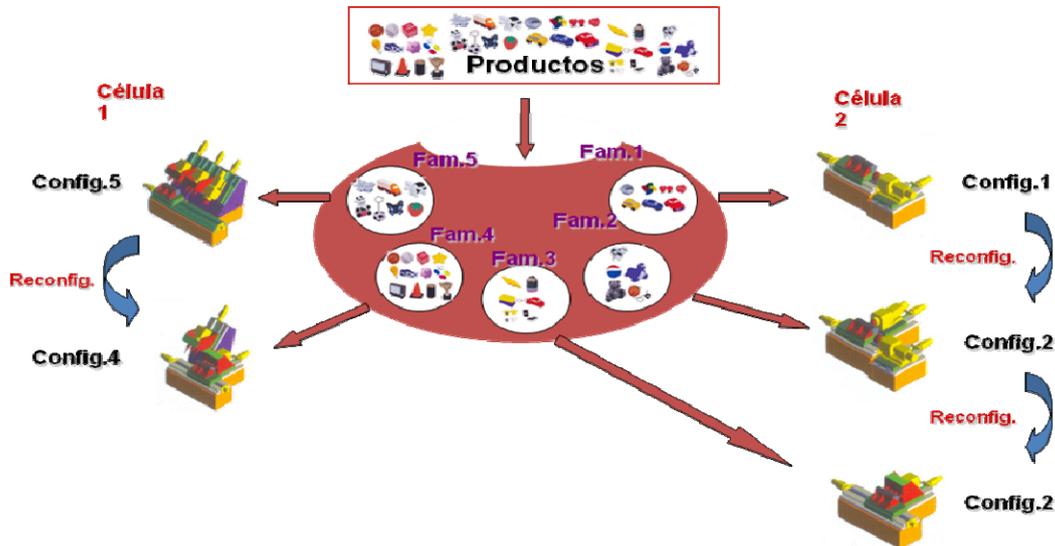


Figura 1. Metodología para asignación, selección y secuenciación de familias de productos

- Agrupación de productos en familias con características similares, mediante métodos de agrupamiento jerárquico. Esta etapa ya ha sido abordada en (Galan et al. (2007a)).
- Asignación de familias a células. El número de células a formar es conocido, así como los costes de preparación de los recursos y los costes de no uso de los mismos.
- Secuenciación de las familias dentro de cada célula. A diferencia de los enfoques tradicionales en fabricación celular, el uso de máquinas reconfigurables implica unos costes de preparación no elevados y por tanto puedes ser eficiente la asignación de varias familias a una célula.

En este trabajo se muestra el desarrollo de un modelo de programación lineal mixta entera MILP basado en los problemas mTSP (multiple travelling salesman problem) que resuelve de forma conjunta las dos últimas etapas de la metodología anterior.

2. Formulación del problema

Los SFR trabajan con el concepto de familias. Una familia es la agrupación de productos con características similares. Las empresas en su labor productiva suelen diferenciar un conjunto de familias. Los métodos de agrupación de productos en familias son muy variados. Entre los métodos más extendidos se encuentra aquellos donde los productos son agrupados formando un dendograma, que representa las familias formadas en base a similitudes entre productos. El dendograma indica, en base a porcentaje, la similitud entre los productos en una familia.

La figura 2 muestra un ejemplo de dendograma para cuatro productos (A,B,C y D), donde se representa un conjunto de familias, indicado por cuatro niveles (L=1,2,3,4). El primer nivel está compuesto por cuatro familias (A), (B), (C) y (D), cada una de las cuales tiene un producto, el segundo nivel está compuesta por tres familias (BC), (A) y (D), el tercer nivel lo forman las dos familias (BC) y (AD) y finalmente el último nivel está compuesta por una única familia (ABCD).

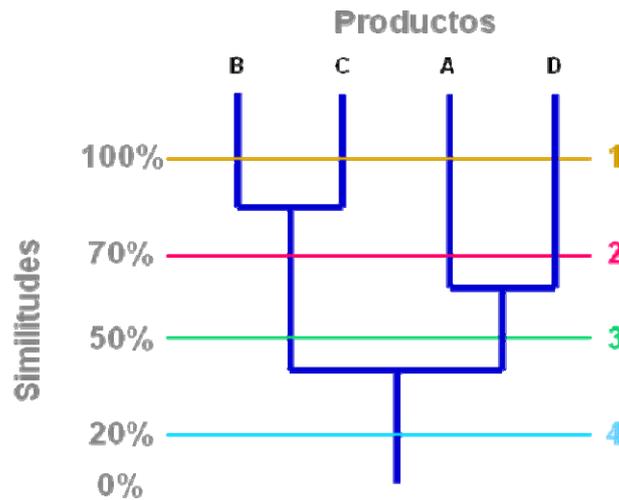


Figura 2. Dendrograma resultado del agrupamiento de 4 productos

El jefe de producción selecciona una familia a producir, y el SFR es configurado para producir todos los productos de la familia seleccionada en la cantidad demandada. Una vez terminada la fabricación de la familia, el sistema es configurado para producir la siguiente familia (Xiaobo et al. (2000)) y así sucesivamente hasta que el sistema fabrica todos los productos, volviendo el sistema a la configuración inicial. En cada cambio de configuración del sistema de producción, la fábrica incurre en costes que depende de la configuración actual y la configuración destino.

La selección de las familias se basará en el dendrograma: hay que seleccionar un único nivel y ordenar las familias de dicho nivel. Los niveles superiores están compuestos por un elevado número de familias con pocos productos y alta similitud entre ellos. Por el contrario, en los niveles inferiores están compuesto por pocas familias con un gran número de productos y baja similitud entre ellos. La selección de las familias a fabricar y su secuenciación en el tiempo pueden ser obtenidos mediante el cálculo del coste en cada nivel del dendrograma, seleccionando aquel nivel que presente menor coste. Se plantean 2 tipos de costes: los costes de reconfiguración, asociados a cambiar los recursos (máquinas y módulos) de una familia a la siguiente, y los costes de no uso, asociados a no utilizar todos los recursos durante la fabricación de una familia (Galan et al. (2007b)). En los niveles superiores serán importantes los costes de reconfiguración y en los inferiores serán los de no uso.

El objetivo de este trabajo, dado un dendrograma basado en la similitud entre productos desde un punto de vista de las características de los sistemas de fabricación reconfigurable, será plantear un modelo MILP que con mínimo costes de reconfiguración y no uso, seleccione el nivel del dendrograma, reparta las familias de productos en células y secuencie las familias dentro de cada célula.

En estudios previos se ha planteado un método de cálculo del dendrograma en SFR (Galan et al. (2007a)) y un modelo MILP de planificación de familias en SFR sin la presencia de células de fabricación (Galan et al. (2007b)). En este artículo se hará la extensión de estos trabajos hacia un modelo de planificación con un número de células conocido.

3. Formulación de un modelo de programación lineal

Este problema en cada nivel del dendograma es muy similar al problema del viajante de comercio (TSP, Traveling Salesman Problem) donde se busca identificar un camino Hamiltoniano que minimiza la distancia viajada por un comerciante que debe recorrer un conjunto de ciudades. En el caso planteado donde hay más de una célula de fabricación en paralelo, el problema en cada nivel pasa a ser equivalente al problema mTSP (Multiple TSP), donde existe más de un comerciante (tantos como células a formar) y se reparten las ciudades a visitar entre ellos, en este caso se reparten las familias entre las células.

La formulación matemática del problema mTSP ha sido ampliamente analizada en la literatura (Bektas (2006)). Existen distintas formulaciones MILP del problema mTSP, destacando dos de ellas: la formulación basada en modelos de asignación y la formulación basada en modelos de flujo en redes. La primera de las formulaciones, basada en los modelos de asignación, se ha utilizado en modelos anteriores de SFR sin células de fabricación, adaptándolo al problema multi-nivel del dendograma (Galan et al. (2007b)).

Se plantea como nueva investigación la utilización del modelo basado en flujo en redes para resolver los problemas de asignación de familias de productos a células de fabricación reconfigurable y secuenciación de las familias dentro de cada célula. La adaptación del modelo del problema mTSP basado en flujo en redes al problema que se plantea implica la introducción de variables que indiquen el nivel seleccionado, y de un nodo inicial $\{0\}$ que representa la configuración de partida y a la que vuelve el sistema una vez fabricadas todas las familias.

Los elementos del modelo son los siguientes:

Datos

L: Número de niveles (se obtiene del dendograma: nivel 1 = cada familia un producto; nivel L = una sola familia con todos los productos)

F_l : Conjunto de familias a fabricar en el nivel l, $l = 1, \dots, L$ (del dendograma)

N_l : Número de familias a fabricar en el nivel l, es decir, $N_l = |F_l|$ (del dendograma)

R_{ijl} : Coste de reconfiguración al pasar de fabricar la familia i a la familia j del nivel l
($i \in F_l + \{0\}$ $j \in F_l + \{0\}$ $j \neq i$ $l = 1, \dots, L - 1$)

H_{il} : Coste de no uso de recursos al fabricar la familia i del nivel l ($i \in F_l$ $l = 1, \dots, L$)

C: Número de células a formar

Variables

$T_{ijl}^k = 1$, si familia i del nivel l se fabrica justo antes que familia j del nivel l en célula k
($i \in F_l + \{0\}$ $j \in F_l + \{0\}$ $j \neq i$; $l = 1, \dots, L - C + 1$; $k = 1, \dots, C$)

$K_l = 1$, si se fabrican las familias del nivel l (todas) ($l = 1, \dots, L - C + 1$)

$U_{il} \geq 0$, variables auxiliares para evitar bucles de asignación de familias en cada nivel
($i \in F_l$ $l = 1, \dots, \min(L - 2; L - C + 1)$)

Modelo

$$\text{Min} \quad \sum_{l=1}^{L-C+1} \sum_{i \in F_l + \{0\}} \sum_{\substack{j \in F_l + \{0\} \\ j \neq i}} \sum_{k=1}^C R_{ijl} T_{ijl}^k + \sum_{l=1}^{L-C+1} \sum_{i \in F_l} K_l H_{il}$$

s.a

$$\sum_{l=1}^{L-C+1} K_l = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{i \in F_l + \{0\}} \sum_{k=1}^C T_{ijl}^k = K_l \quad : l = 1, \dots, L - C + 1; \quad j \in F_l \quad (2)$$

$$\sum_{j \in F_l + \{0\}} T_{ijl}^k - \sum_{j \in F_l + \{0\}} T_{jil}^k = 0 \quad : i \in F_l + \{0\}; \quad l = 1, \dots, L - C + 1; \quad k = 1, \dots, C \quad (3)$$

$$\sum_{j \in F_l} T_{0jl}^k = K_l \quad : k = 1, \dots, C; \quad l = 1, \dots, L - C + 1 \quad (4)$$

$$(N_l + 1) \cdot \sum_{k=1}^C T_{ijl}^k + U_{il} - U_{jl} \leq N_l \quad : i \in F_l; \quad j \in F_l; \quad j \neq i; \quad l = 1, \dots, \min(L - 2, L - C + 1) \quad (5)$$

$$T_{ijl}^k = \{0, 1\} \quad : i \in F_l + \{0\}; \quad j \in F_l + \{0\}; \quad j \neq i; \quad l = 1, \dots, L - C + 1; \quad k = 1, \dots, C$$

$$K_l = \{0, 1\} \quad : l = 1, \dots, L - C + 1$$

$$U_{il} \geq 0 \quad : i \in F_l; \quad l = 1, \dots, \min(L - 2, L - C + 1) \quad (6)$$

La restricción (1) activa el nivel del dendograma con mínimo coste. Las restricciones (2) indican que en cada nodo (familia) entra un arco activo solamente (familia precedente), las restricciones (3) indican que en cada nodo lo que entra es igual a lo que sale, es decir, si en un nodo un arco que entra se activa entonces tiene que activarse un arco que sale, y las restricciones (4) indican que del nodo origen salen tantos arcos como células haya (equivalente a viajeros en el mTSP). Finalmente las restricciones de eliminación de subrutas (5) previenen la formación de subsecuencias entre familias intermedias sin conexión con la configuración origen. Se han utilizado las restricciones de (Miller et al. (1960)), donde se evitan subciclos de rutas en el problema TSP. Las variables binarias y continuas vienen expresadas al final (6).

Dimensiones

Sabiendo que el número de familias dentro de un nivel l (N_l) es de $L-l+1$, entonces se puede calcular el número de variables (tabla 1) y de restricciones (tabla 2) en función del número de niveles L , que además coincide con el número de productos, y del número de células C .

Tabla 1. Número de variables del problema

Variables	Número de variables	
Tijlk	$C \cdot \sum_{l=C}^L (l+1) \cdot l$	$\frac{CL^3 + 3CL^2 + 2CL - C^4 + C^2}{3}$
Kl	L-C+1	L-C+1
Uil	$\sum_{l=\max(2,C-1)}^L l$	$\leq \frac{L^2 + L - 2}{2}$

Tabla 2. Número de restricciones del problema

Restricciones	Número de restricciones	
(1)	1	1
(2)	$\sum_{l=C}^L l$	$\frac{L^2 + L - C^2 + C}{2}$
(3)	$C \cdot \sum_{l=C}^L (l+1)$	$\frac{CL^2 + 3CL - C^3 - C^2 + 2}{2}$
(4)	C(L-C+1)	CL - C ² + C
(5)	$\sum_{l=\max(2,C-1)}^L l(l-1)$	$\leq \frac{L^3 - L}{3}$

4. Resultados experimentales

La escasez de experimentos en SFR obliga a la adaptación de ejemplos realizados en sistemas de fabricación celulares, incluyendo los elementos propios de los sistemas reconfigurables. Se han experimentado con 16 instancias de 8 a 37 productos y cada una de estas instancias se ha resuelto para 1, 2 y 3 células. Todos los problemas se han resuelto usando el software de programación matemática CPLEX v10 usando un PC con CPU a 1.6 GHz. En la tabla 3 se muestran los tamaños de los problemas y los resultados obtenidos (costes totales y tiempos de computación).

Tabla 3. Tamaños de los problemas y resultados

N° Problema	N° Productos	1 Célula			2 Células			3 Células		
		Coste	Tiempo (seg.)	N° Variables	Coste	Tiempo (seg.)	N° Variables	Coste	Tiempo (seg.)	N° Variables
1	8	57	0,09	248	38	0,28	483	19	0,08	702
2	9	64	0,03	339	52	0,05	664	41	0,11	973
3	10	111	0,23	450	93	0,09	885	75	0,28	1304
4	11	112	1,08	583	86	1,67	1150	61	0,31	1701

5	12	51	1,42	740	29	1,56	1463	17	1,94	2170
6	13	117	0,06	923	96	0,09	1828	80	0,13	2717
7	14	122	3,09	1134	89	1,95	2249	71	3,1	3348
8	15	102	6,86	1375	75	13,89	2730	58	19,06	4069
9	16	201	48,78	1648	159	42,25	3275	128	29,97	4886
10	19	103	1,78	2679	91	6,06	5334	79	4,55	7973
11	20	300	9,66	3100	266	5,58	6175	237	26,38	9234
12	22	267	23,38	4070	214	284,45	9113	177	978,14	12140
13	24	401	84,36	5224	366	380,22	10419	336	734,84	15598
14	26	440	247,09	6578	389	772,81	13125	346	1679,95	19656
15	30	433	285,34	9950	403	3316,8	19865	373	7034,41	29764
16	37	659	2995,84	18315	587	1901,58	36588	547	12451,11	54845

En la figura 3 se muestra la evolución de los tiempos de computación con el número de productos para los problemas referidos, considerando 1, 2 y 3 células por separado.

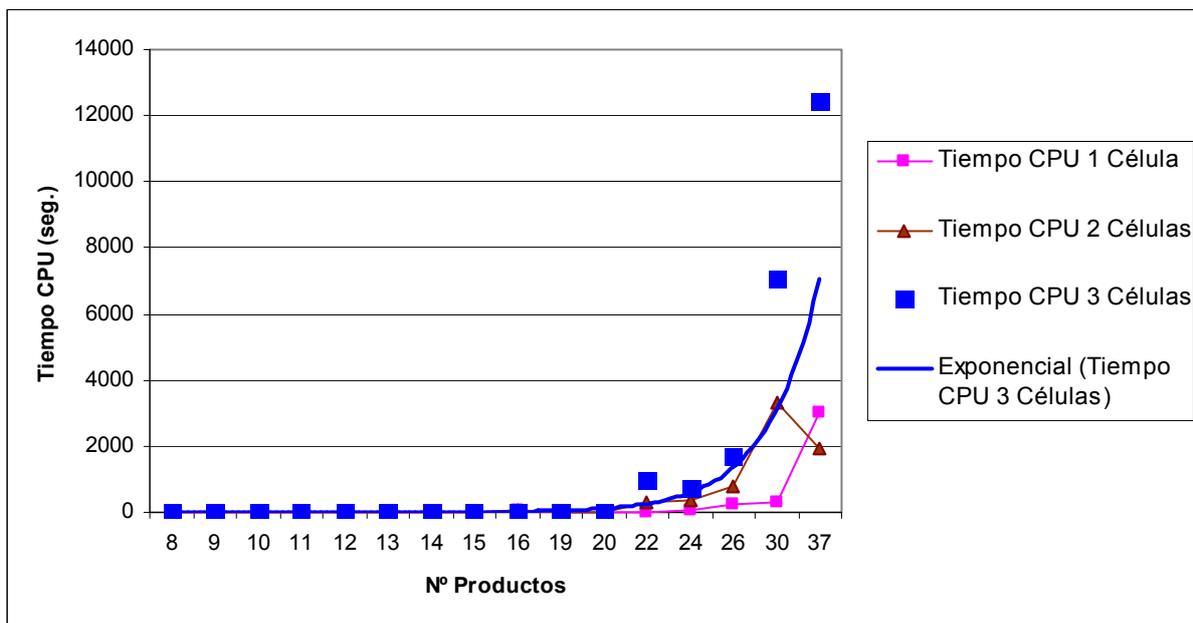


Figura 3. Tendencia de los tiempos de CPU en función del nº de productos y de células

En la figura 3 se observa un fuerte crecimiento de los tiempos de CPU con el número de productos. En especial cuando el número de productos está por encima de 40 y el número de células es de 3 o más, la resolución de este tipo de problemas de forma óptima no es viable y se hace necesario usar técnicas aproximadas.

5. Conclusiones

En este artículo se ha presentado una metodología que resuelve el problema de la formación de células y familias de productos y la secuenciación de dichas familias cuando existen

máquinas reconfigurables. La metodología usa técnicas de agrupamiento jerárquico, propias de la fabricación celular, convenientemente modificadas para los requisitos propios de los sistemas de fabricación reconfigurable. Para la selección de las familias de productos, la asignación de dichas familias a células y la secuenciación de las familias dentro de cada célula, se ha formulado un modelo de programación mixta entera basado en el problema de multiple TSP por su analogía. El modelo finalmente ha sido ejecutado con 16 problemas diferentes adaptados de la literatura, y sus resultados demuestran su viabilidad para problemas de menos de 40 productos y 3 células. Para problemas se hace necesario el uso de técnicas aproximadas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto DPI-2008-04788.

Referencias

- Bektas T. (2006). The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, Vol. 34, pp. 209-219.
- Galan, R.; Racero, J.; Eguia, I.; Garcia, J.M. (2007a). A systematic approach for product families formation in Reconfigurable Manufacturing Systems. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 23, pp. 489-502.
- Galan, R.; Racero, J.; Eguia, I.; Canca, D. (2007b). A Methodology for Facilitating Reconfiguration in Manufacturing: The Move Towards Reconfigurable Manufacturing Systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 33, pp.345-353.
- Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G.; Van Brussel. H. (1999). Reconfigurable Manufacturing Systems. *Annals of the CIRP*, Vol. 48, pp. 1-14.
- Lei, M.; Yang, X.; Tseng. M.; Yang, S. (1998). Design and intelligent machine center: strategy and practice. *J. Mechatronics*, Vol. 8, pp. 275-281.
- Miller, C.E.; Tucker, A.W.; Zemlin, R.A. (1960). Integer programming formulations and the travelling salesman problem. *Journal of the Association for Computing Machinery*, Vol. 7, pp. 326-329.
- Molina, A.; Rodríguez, C.A.; Ahuett, H.; Cortés, J.A.; Ramírez, M.; Jiménez, G.; Martínez, S. (2005). Next-generation manufacturing systems: key research issues in developing and integrating reconfigurable and intelligent machines. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, pp. 225-236.
- Pattanaik, L.N.; Jain, P.K.; Mehta, N.K. (2007). Cell formation in the presence of reconfigurable machines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, pp. 335-345.
- Svensson, C.; Barfod A. (2002). Limits and opportunities in mass customization for built to order SMEs. *Computers in Industry*, Vol. 49, pp. 77-89.
- Xiaobo, Z.; Jiancai, W.; Zhenbi, L. (2000) A Stochastic Model of a Reconfigurable Manufacturing System, Part 1: A Framework. *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 10, pp. 2273-2285.