

Modelo de Planificación de la Producción para los Sistemas de Fabricación Reconfigurable

Ignacio Eguía, Ricardo Galán, Jesús Racero, David Canca

Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla. {ies; rdevega; jrm; dco}@esi.us.es

Resumen

La industria de la fabricación actual tiene entre manos el reto de responder rápidamente a las cada vez más dinámicas necesidades de los consumidores. La clave del éxito en este entorno altamente competitivo es la capacidad de las empresas para llevar al mercado nuevos productos de alta calidad, a bajo coste y en un corto periodo de tiempo. Esto se consigue fomentando productos y servicios de alto valor añadido mediante una personalización de productos en masa, es decir, trabajando con una variedad de productos personalizados, economías de escala y alta flexibilidad en los procesos productivos. Los Sistemas de Fabricación Reconfigurable (SFR) surgen para afrontar este reto. Los SFR son sistemas flexibles, no sólo por su capacidad para producir una amplia variedad de productos, sino por su capacidad de cambiar el sistema de fabricación en sí mismo. Se forman con combinaciones de módulos (hardware y software) que pueden ser cambiados de forma rápida y fiable. La investigación en el diseño y planificación de SFR está en sus inicios. En este artículo se propone un modelo de planificación de la producción de SFR para la secuenciación de familias de productos de características similares con el objetivo de minimizar los costes asociados a la configuración y al uso de la funcionalidad del sistema.

Palabras clave: Reconfigurabilidad, modelado, fabricación

1. Introducción

La situación actual de los mercados está caracterizada por la globalización, requerimientos de nuevos productos, frecuentes cambios en su demanda y una mejora continua de la tecnología existente en las actividades productivas. La reducción del tiempo de lanzamiento de los nuevos productos al mercado con alta calidad y a bajo coste es un requisito fundamental para sobrevivir en este nuevo escenario (Xiaobo *et al.* 2000). Los sistemas de fabricación deben ser capaces de producir una amplia variedad de productos, en cantidades variables y con la capacidad y funcionalidad requerida. Para afrontar este reto, surgen los Sistemas de Fabricación Reconfigurables (SFR). La definición más extendida de sistema de fabricación reconfigurable se debe a Koren *et al.* (1999), quienes lo definieron como un sistema de fabricación diseñado desde el comienzo para soportar cambios en su estructura y así ajustar su capacidad productiva y funcionalidad de forma rápida dentro de una familia de piezas, como respuesta a los repentinos cambios del mercado.

Los sistemas reconfigurables deben permitir la reconfiguración simultánea de todo el sistema, del hardware de las máquinas y del software de control. Los SFR se diseñan mediante el uso de hardware y software reconfigurables para conseguir que la capacidad y funcionalidad del sistema no sea fija y pueda cambiar con el tiempo. Así se consigue flexibilidad en la fabricación de una variedad de piezas y en el cambio del propio sistema productivo.

El funcionamiento de un SFR comienza con la clasificación de productos en familias, cada una formada por un conjunto de productos similares. Antes de comenzar, el fabricante selecciona una de las familias formadas y configura el sistema para fabricarla con la capacidad y funcionalidad requerida. Una característica propia de un SFR es su modularidad, que implica que las máquinas estén compuestas por módulos, configurando el sistema a las máquinas y módulos necesarios para fabricar cada familia. Una vez que se termina de fabricar la familia, se escoge una segunda familia y el sistema se reconfigura para fabricarla de forma efectiva, con su capacidad y funcionalidad exactas, y así sucesivamente. Por tanto, la configuración del sistema cambia cada vez que se fabrica una familia.

Las investigaciones referidas a la planificación de la producción en SFR se centran en la determinación de la secuencia en que las distintas familias formadas se van a fabricar. La elección de una u otra secuencia determinará un coste diferente de implantación del sistema, por lo que su correcta elección resulta fundamental. La determinación de los costes a evaluar es un aspecto central en la resolución del problema así como el desarrollo de alguna herramienta que facilite la obtención de la secuencia de producción haciendo que los costes en que se incurren para configurar el sistema sean mínimos.

2. Punto de Partida

El número de familias de productos que se pueden formar depende del número de productos que hay que agrupar, existiendo diversos métodos de agrupación. Uno de ellos es la agrupación de productos mediante dendogramas, que son estructuras en forma de árbol invertido que representan la formación de familias según la similitud entre los productos que las forman. De esta forma, los productos más parecidos serán agrupados. El dendograma indica el porcentaje de similitud entre los productos que forman las familias. Un ejemplo de dendograma puede verse en la Figura 1.

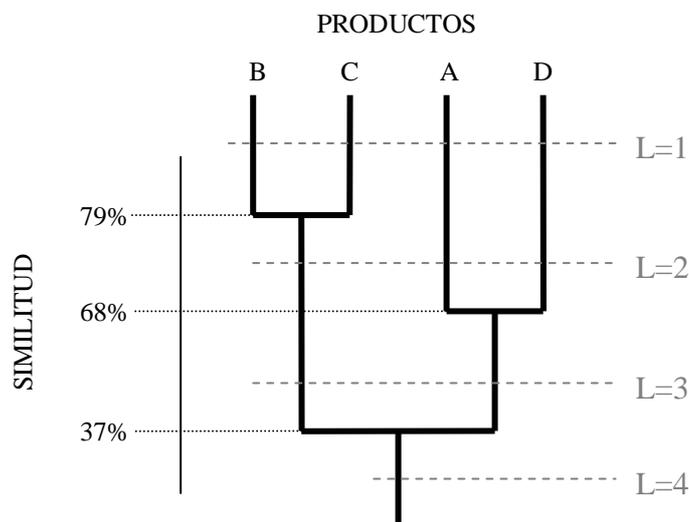


Figura 1. Dendograma

La selección de familias se realiza a partir del dendograma. En éste se diferencian varios niveles que hacen referencia a las distintas familias de productos que se pueden formar. En dicho dendograma existen cuatro niveles, cada uno con diferentes familias. Los primeros niveles están compuestos por familias con pocos productos y alta similitud entre ellos. Por el contrario, las familias de los últimos niveles tienen muchos productos con baja similitud entre

ellos. Por ejemplo, se pueden seleccionar dos familias con similitud del 68% (nivel 3), una compuesta por los productos *B–C* y otra por los productos *A–D*.

3. Parámetros de Selección

Un SFR se centra en la fabricación de familias de productos en un mismo sistema, el cual se configura para producir cada familia. Una vez que la familia se fabrica, el sistema se reconfigura para fabricar la familia siguiente de forma efectiva. En cada cambio de configuración, la empresa fabricante incurre en costes debido a la modificación del sistema productivo que depende de la configuración existente y de la configuración final (Xiaobo *et al.*, 2000).

Sobre la formación de familias de productos, podría darse el caso de que todos los productos estuvieran agrupados en una única familia, por lo que el sistema productivo estaría compuesto de todas las máquinas necesarias para fabricar los productos. En este caso, la empresa no incurre en costes de reconfiguración del sistema, pero existirán máquinas ociosas y/u otras cuyas funcionalidades no sean completamente utilizadas cuando se fabriquen los productos. Además, la capacidad de las máquinas suele ser mayor que la requerida para la fabricación de cada producto de forma independiente. Por el contrario, en el caso de seleccionar una familia para cada producto, la empresa tiene que hacer frente a costes de reconfiguración del sistema, pero en cambio el número de máquinas ociosas desaparece y sus funcionalidades y capacidades quedan totalmente aprovechadas. El último caso ocurre cuando se seleccionan menos familias que productos. En esta ocasión, aunque existen costes de reconfiguración, éstos serán menores que en el último caso al existir menos cambios. También el número de máquinas ociosas es inferior a las del primer caso. Las funcionalidades y capacidades de las máquinas no se usan completamente, aunque su ratio de utilización es superior al del primer caso. Como conclusión, hay que llegar a un equilibrio entre los costes de reconfiguración en los niveles superiores del dendograma y los costes de no-uso de los niveles inferiores. Por tanto, los parámetros clave a tomar en consideración para la selección de familias de productos son: el coste de reconfiguración del sistema productivo, el coste de tener máquinas ociosas, el coste de no-uso de las funcionalidades de las máquinas y el coste de no-uso de la capacidad de las máquinas. Estos parámetros se simplifican en dos: coste de reconfiguración y coste de no-uso de los recursos de las máquinas.

La selección de familias de productos puede realizarse calculando estos costes en cada nivel del dendograma, de forma que se selecciona el nivel que presente el coste más bajo. De esta manera se evalúan todas las soluciones posibles ofrecidas por el dendograma. El tiempo de cálculo depende directamente del número de posibles combinaciones de secuencias de familias, que puede ser muy superior al tiempo que dispone la empresa para tomar la decisión. Por tanto, se necesita un modelo matemático que facilite la selección de familias de productos y que incluya los parámetros clave identificados anteriormente.

4. Estimación de Costes

Para la resolución del problema de selección de familias de productos es fundamental tener unos costes precisos. En la Literatura no existe ninguna metodología de estimación de los costes necesarios para el cambio de módulos y máquinas en fabricación reconfigurable. En esta sección se presenta el diseño de una metodología específica para la obtención de dichos costes, teniendo en consideración las singularidades de los SFR.

En lugar de hacer una estimación directa y global de ambos costes, se ha seguido una estrategia de “divide y vencerás”. De una parte, los costes de reconfiguración se han dividido en tres parámetros, cada uno con su propio coste. Estos parámetros son: (i) se retira o se incluye un módulo de una máquina, (ii) se retira una máquina y (iii) se incluye una máquina. De otra parte, los costes de no-uso se han dividido en dos parámetros cuyos costes serán estimados. Estos parámetros son: (i) un módulo no se usa cuando se fabrica un producto de una cierta familia y (ii) una máquina (con todos sus módulos) no se usa cuando se fabrica un producto de una cierta familia.

Los cinco parámetros anteriores dependen del módulo o máquina considerada, es decir, la estimación de estos parámetros se hace por cada módulo y cada máquina.

Se incurre en los costes de reconfiguración cuando se cambia la configuración del sistema al pasar de fabricar una familia de productos a fabricar la siguiente. Estos costes tienen que ser calculados, en cada nivel del dendograma, para cada par de familias. El último nivel contiene una sola familia por lo que no se necesita reconfigurar el sistema. Esto se muestra en la función objetivo del modelo, cuyo primer término evalúa el coste de reconfiguración hasta el nivel $L-1$, siendo L el número total de niveles.

La estimación de costes comienza con la identificación de los componentes de los productos que forman las familias. Dichos componentes son fabricados por módulos específicos que pertenecen a ciertas máquinas. Como se ha comentado anteriormente, las máquinas en los SFR están compuestas por diferentes módulos que desempeñan una cierta funcionalidad.

El coste de los parámetros de reconfiguración se estima en base a la experiencia. El primer parámetro indica si un módulo perteneciente a una máquina se usa en la fabricación de la siguiente familia o no. El segundo parámetro indica que una máquina que se está usando no es necesaria para la fabricación de la siguiente familia, y el tercero indica que una máquina no usada en la configuración actual es necesaria para la fabricación de la nueva familia. Para una secuencia de familias, el coste de reconfiguración (en €) se calcula como la suma del producto del coste de cada parámetro (en €/cambio) por el número de cambios o retirada/inclusión de módulos o máquinas.

Se incurre en los costes de no-uso de los recursos cuando no se utiliza alguna máquina o módulo de máquina. Estos costes se calculan para cada producto de las familias formadas en cada nivel del dendograma. El primero de sus niveles está compuesto por familias de un solo producto. Puesto que los SFR se configuran para fabricar una cierta familia cada vez, cuando se fabrica una familia de un solo producto el sistema se configura con la capacidad y funcionalidad requerida para dicho producto (Koren *et al.*, 1999) permitiendo un uso total de los recursos instalados. Consecuentemente, el coste de no-uso de las familias compuestas por un producto es de cero. El primer parámetro del coste de no-uso indica si un módulo de una máquina no se usa al fabricar otro producto de la misma familia. El segundo parámetro indica si una máquina no se usa al fabricar un producto de la familia. Los costes de no-uso para una secuencia de fabricación (en €) se calcula como la suma de los productos de cada parámetro (en €/tiempo de no-uso) por el tiempo de no-uso de cada módulo o máquina. Puesto que no se tienen los tiempos de fabricación de los componentes en las máquinas reconfigurables, se ha realizado una aproximación para el cálculo de los costes de no-uso. Así, en lugar de contabilizar tiempos se contabiliza el número de veces que un módulo o máquina no se utiliza al fabricar un producto.

5. Modelo Matemático

En este apartado se realizará el planteamiento de un primer modelo matemático que resuelva el problema de la selección y secuenciación de familias de productos en SFR. Posteriormente éste modelo será validado y aplicado a una batería de problemas para su resolución.

5.1. Planteamiento

La fabricación basada en SFR comienza con la producción de una de las familias de productos creadas previamente. Cuando se termina, el sistema de fabricación se reconfigura para la producción de la siguiente familia de productos de forma específica. Este proceso se repite hasta que se termina la producción de la última familia, tras la que el sistema se reconfigura para comenzar de nuevo con la producción de la primera familia. Dos de las razones que llevan a repetir cíclicamente la producción de todas las familias son, por un lado, la llegada de nuevas órdenes de productos de familias ya fabricadas y, por otro lado, las limitaciones en la capacidad de almacenamiento por parte de las empresas. Sólo cuando las empresas añaden o quitan productos de sus carteras o sus demandas son muy variables, la metodología propuesta puede seleccionar familias de productos distintas o secuencias de producción distintas.

El problema puede ser modelado como el problema del viajante de comercio (TSP, *Traveling Salesman Problem*) en el que se trata de identificar un itinerario que minimice la distancia total recorrida por el viajante que tiene que visitar un cierto número de ciudades una sola vez, partiendo de una de ellas (ciudad base) y acabando su viaje en la misma. El objetivo de minimizar la distancia se puede cambiar por minimizar su coste o su tiempo total de recorrido. A simple vista surgen muchas similitudes con el problema a resolver. Primero, las ciudades en el TSP se pueden comparar con las familias de productos en los SFR. Segundo, el objetivo en el TSP es minimizar la distancia/coste/tiempo total de recorrido, mientras que en los SFR el objetivo es minimizar el coste total. Por último, en el TSP el viajante tiene que acabar en la ciudad base, mientras que en los SFR al completar la fabricación de la última familia éstos se reconfiguran para fabricar de nuevo la primera familia.

El modelo propuesto resuelve un TSP en cada nivel del dendograma, identificando en cada uno de ellos el recorrido o secuencia que presenta menores costes. Posteriormente, se comparan las mejores secuencias de cada nivel y se selecciona el nivel que presenta la secuencia de coste mínimo. Por tanto, el problema a resolver es un TSP-multinivel. Nótese que los costes de no-uso en cada familia de un mismo nivel del dendograma (por cada TSP que se resuelve) son iguales sea cual sea la secuencia de fabricación, por tanto sólo hay que tener en cuenta los costes de reconfiguración. A la secuencia que presente el coste de reconfiguración total mínimo habrá que añadirle los costes de no-uso para calcular el coste total. Debido a que el TSP es un problema de optimización combinatoria de la clase NP (Rinnooy Kan, 1976), la selección y secuencia de las familias de productos en SFR también es un problema NP. Este modelo supone que las máquinas son capaces de soportar toda la demanda (tienen capacidad infinita). Se asume que existe una única ruta de fabricación para cada producto, es decir, que existe un único plan de proceso para cada componente de producto y que cada operación o conjunto de operaciones se realiza en una sola máquina o módulo de máquina. Cada máquina tiene sus propios módulos que no comparte con otras máquinas.

La notación usada para el desarrollo del modelo (índices, parámetros y variables) se muestra en la Tabla 1. El objetivo es seleccionar el conjunto de familias a fabricar y su secuencia de fabricación tal que se minimicen los costes de reconfiguración del sistema y los costes de no uso de los recursos de las máquinas mientras se fabrican las familias.

Tabla 1. Índices, parámetros y variables del modelo básico

Índices	
i, j	Familias
l	Nivel
Parámetros	
L	Número de niveles
F_l	Conjunto de familias a fabricar en el nivel l ($l=1, \dots, L$)
N_l	Número de familias a fabricar en el nivel l , por tanto $N_l = F_l $
R_{ij}	Coste de reconfiguración de la familia i a la familia j ($i \in F_l; j \in F_l; i \neq j$)
H_i	Coste de no uso de los recursos de máquinas al fabricar la familia i
Variables	
T_{ijl}	1 si familia i se fabrica justo antes de familia j en el nivel l ($i \in F_l; j \in F_l; i \neq j; l=1, \dots, L-1$)
Q_{il}	1 si se fabrica la familia i en el nivel l ($i \in F_l; l=1, \dots, L$)
K_l	1 si se fabrican todas las familias en el nivel l ($l=1, \dots, L$)
U_{il}	≥ 0 , variables auxiliares para evitar subrutas ($i \in F_{l-1}; l=1, \dots, L-2$)

Las restricciones a tener en cuenta son:

- Se selecciona sólo uno de los niveles del dendograma.
- Se fabrican todas las familias del nivel seleccionado y ninguna del resto de niveles.
- En cada nivel l , las familias se fabrican una a una siguiendo un orden de fabricación. Al final, el sistema se reconfigura para fabricar la familia inicial. Antes y después de la fabricación de una familia, el sistema ha fabricado y fabricará solo una familia y no varias.
- No se permiten sub-rutas en los niveles del dendograma. Para evitarlas se introducen las restricciones de Miller-Tucker-Zemlin (1960). Este conjunto de restricciones evitan que, por ejemplo, cinco familias sean fabricadas en dos caminos distintos, como: 1-2-3-1-... y 4-5-4-...
- Restricciones de signo de variables binarias (T , Q , y K) y variables auxiliares (U).

Por tanto, el modelo matemático propuesto es el siguiente:

$$\text{Min} \quad \sum_{i \in F_l} \sum_{\substack{j \in F_l \\ j \neq i}} \sum_{l=1}^{L-1} R_{ij} T_{ijl} + \sum_{i \in F_l} \sum_{l=1}^L H_i Q_{il} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{l=1}^L K_l = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i \in F_l} Q_{il} = N_l K_l \quad \forall l = 1, \dots, L \quad (3)$$

$$\sum_{i \in F_l} \sum_{\substack{j \in F_l \\ j \neq i}} T_{ijl} = N_l K_l \quad \forall l = 1, \dots, L-1 \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{j \in F_l \\ j \neq i}} T_{ijl} \leq 1 \quad \forall i \in F_l \quad \forall l = 1, \dots, L-2 \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{i \in F_l \\ i \neq j}} T_{ijl} \leq 1 \quad \forall j \in F_l \quad \forall l = 1, \dots, L-2 \quad (6)$$

$$N_l T_{ijl} + U_{il} - U_{jl} \leq N_l - 1 \quad \forall i \in F_l - 1 \quad \forall j \in F_l - 1 \quad j \neq i \quad \forall l = 1, \dots, L-2 \quad (7)$$

$$T_{ijl} = \{0,1\} \quad \forall i \in F_l \quad \forall j \in F_l \quad j \neq i \quad \forall l = 1, \dots, L-1 \quad (8)$$

$$Q_{il} = \{0,1\} \quad \forall i \in F_l \quad \forall l = 1, \dots, L \quad (9)$$

$$K_l = \{0,1\} \quad \forall l = 1, \dots, L \quad (10)$$

$$U_{il} \geq 0 \quad \forall i \in F_l - 1 \quad \forall l = 1, \dots, L-2 \quad (11)$$

Las familias se fabrican siguiendo un orden cíclico. No importa qué familia se fabricará primero siempre que se respete el orden establecido. No existen costes asociados al orden de fabricación.

Los parámetros que se necesitan para la resolución del modelo están descritos en la Tabla 1. La mayoría de ellos (L , F_l , y N_l) se pueden obtener directamente del dendograma, pero el resto (costes de reconfiguración y de no-uso) son desconocidos y por tanto se tienen que estimar. Una vez que se han calculado los costes de reconfiguración y de no-uso se puede resolver el modelo matemático formulado anteriormente.

La información de entrada para resolver el modelo se puede automatizar de forma simple, con mínima intervención humana. La metodología de costes necesita información de la lista de materiales (BOM), que se encuentra almacenada en el sistema de información de la empresa. El BOM informa sobre los componentes de un determinado producto y sobre las máquinas que lo fabrican. La intervención humana consiste en la estimación de los cinco parámetros identificados previamente sobre los costes de reconfiguración y de no-uso. Los valores de dichos parámetros se introducen en el sistema de información y se enlazan con el BOM para la obtención de los costes necesarios para resolver el modelo.

5.2. Resultados Experimentales

La investigación y desarrollo de los SFR está en sus inicios. A nivel de componentes del sistema de fabricación, las máquinas reconfigurables están actualmente en fase de diseño y prueba. Sin embargo, para experimentar con el modelo, se han tomado algunos problemas existentes en la literatura sobre sistemas de fabricación celular (SFC).

Estos problemas se han modificado convenientemente para ser tomados como problemas de fabricación reconfigurable. En concreto, los datos de los problemas de SFC son máquinas y piezas. Para ser considerados como problemas de SFR, las máquinas se han tomado como productos y las piezas como componentes de dichos productos. Además, se ha escogido el mismo número de máquinas reconfigurables que de productos y el número de módulos de máquinas es el doble que de máquinas. La Tabla 2 muestra el conjunto de problemas que se van a probar, así como el tamaño de los mismos referentes a número de productos, componentes, variables, restricciones y tiempo de CPU en formato *hh:mm:ss*.

Tabla 2. Tamaño de los problemas

Problema	Nº prod.	Nº comp.	Nº var.	Nº restr.	Tiempo CPU
Shargal et al. 1995 prob2	8	20	239	194	0:00:00
Shargal et al. 1995 prob4	9	7	329	270	0:00:00
Co y Araar 1988	10	15	439	364	0:00:00
Akturk y Balkose 1996	10	20	439	364	0:00:00
Cheng et al. 1996 prob1	10	25	439	364	0:00:00
Shargal et al. 1995 prob3	10	38	439	364	0:00:00
Seifodini 1989	11	22	571	478	0:00:03
McCormick et al. 1972 prob1	12	10	727	614	0:00:27
Vakharia y Wemmerlov 1990	12	19	727	614	0:00:09
Crama y Oosten 1996	13	25	909	774	0:00:02
Askin y Subramanian 1987	14	24	1119	960	0:01:04
Chan y Milner 1982	15	10	1359	1174	0:00:03
Shargal et al. 1995 prob1	15	10	1359	1174	0:00:16
Chen y Cheng 1995	15	15	1359	1174	0:00:46
Boctor 1991 prob1	16	30	1631	1418	0:00:11
Boctor 1991 prob2	16	30	1631	1418	0:01:17
Boctor 1991 prob3	16	30	1631	1418	0:02:12
Boctor 1991 prob4	16	30	1631	1418	0:00:07
Boctor 1991 prob5	16	30	1631	1418	0:03:14
Boctor 1991 prob6	16	30	1631	1418	0:13:57
Boctor 1991 prob7	16	30	1631	1418	0:02:51
Boctor 1991 prob8	16	30	1631	1418	0:00:33
Boctor 1991 prob9	16	30	1631	1418	0:06:26
Boctor 1991 prob10	16	30	1631	1418	0:00:34
Srinivasan et al. 1990	16	30	1631	1418	0:00:14
King 1980	16	43	1631	1418	0:01:21
Askin et al. 1991	19	12	2659	2350	0:00:43
Ventura et al. 1990 prob2	20	23	3079	2734	0:22:43
Cheng et al. 1996 prob2	20	25	3079	2734	0:01:19
Cheng et al. 1996 prob3	20	25	3079	2734	0:13:28
Ng 1996	20	35	3079	2734	0:45:20
Ventura et al. 1990 prob1	22	11	4047	3624	45:51:28
Kumar et al. 1986	23	20	4599	4134	1:59:14
Adil et al. 1997	26	37	6551	5948	45:33:47
McCormick et al. 1972 prob2	27	27	7307	6654	0:09:35

El número de familias de productos en la solución óptima varía desde una sola (todos los productos agrupados en una familia) hasta una por cada producto individual. El tiempo de CPU necesario para resolver el modelo propuesto se incrementa a la vez que aumenta el número de productos a agrupar.

Estos problemas se han resuelto con un software de programación lineal, usando un ordenador con CPU a 3,06 GHz y 256 MB. En la Figura 2 se presenta, para todos los problemas de la tabla anterior la variación del tiempo de CPU con respecto al número de productos. Dicha figura muestra la tendencia exponencial del tiempo de CPU requerido para la resolución de problemas.

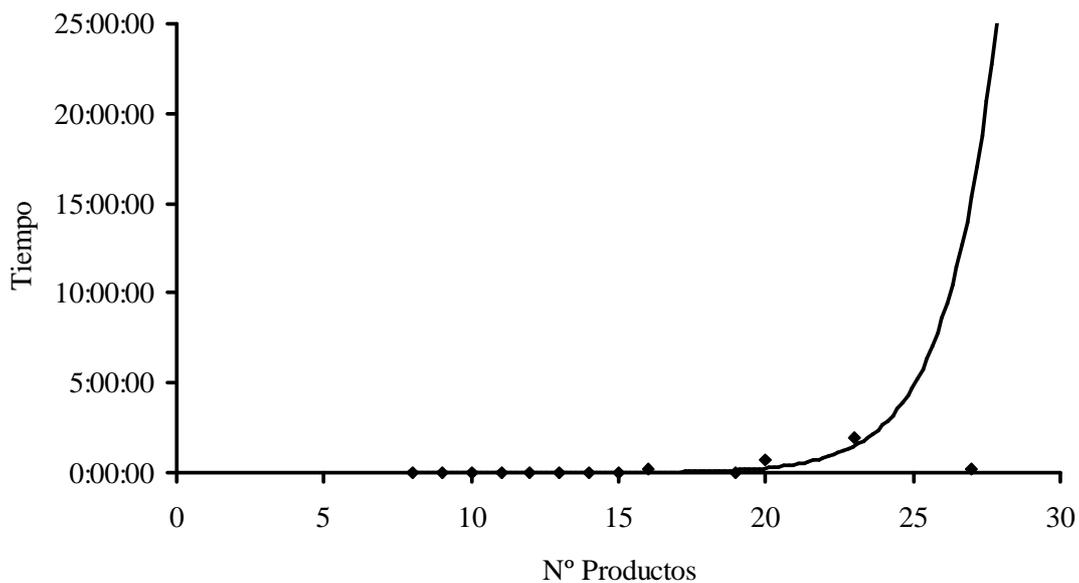


Figura 2. Tendencia del tiempo de resolución respecto al número de productos

6. Conclusiones

Se ha planteado un modelo MILP para la secuenciación de familias de productos en una SFR en base a los costes de reconfiguración y de no-uso que utiliza como punto de partida el resultado de un método de agrupación de familias, y como datos adicionales los costes de cambio de máquinas y módulos y de no-uso de componentes. Los resultados muestran una lógica tendencia exponencial con el nº de productos que obliga a emplear métodos aproximados para problemas con más de 25 productos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia por medio del Proyecto DPI-2005-09210.

Referencias

Adil, G.K.; Rajamani, D.; Strong, D. (1997). Assignment allocation and simulated annealing algorithms for cell formation. *IIE Transactions*, Vol. 29, No. 1, pp. 53-67.

- Akturk, M.S.; Balkose, H.O. (1996). Part-machine grouping using a multi-objective cluster analysis. *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 8, pp. 2299-2315.
- Askin, R.G.; Cresswell, S.H.; Goldberg, J.B.; Vakharia, A.J. (1991). Hamiltonian path approach to reordering the part-machine matrix for cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*, Vol. 29, No. 6, pp. 1081-1100.
- Askin, R.G.; Subramanian, P. (1987). Cost-based heuristic for group technology configuration. *International Journal of Production Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 101-113.
- Boctor, F.F. (1991). A linear formulation of the machine-part cell formation problem. *International Journal of Production Research*, Vol. 29, No. 2, pp. 2601-2614.
- Chan, H.M.; Milner, D.A. (1982). Direct clustering algorithm for group formation in cellular manufacture. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 65-75.
- Chen, S.J.; Cheng, C.S. (1995). Neural network-based cell formation algorithm in cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*, Vol. 33, No. 2, pp. 293-318.
- Cheng, C.H.; Goh, C.H.; Lee, A. (1996). Solving the generalized machine assignment problem in group technology. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 47, No. 6, pp. 794-802.
- Co, H.C.; Araar, A. (1988). Configuring cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, Vol. 26, No. 9, pp. 1511-1522.
- Crama, Y.; Oosten, M. (1996). Models for machine-part grouping in cellular manufacturing. *International Journal of Production Research*, Vol. 34, No. 6, pp. 1693-1713.
- King, J.R. (1980). Machine-component grouping in production flow analysis: an approach using a rank order clustering algorithm. *International Journal of Production Research*, Vol. 18, No. 2, pp. 213-232.
- 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.
- Kumar, K.R.; Kusiak, A.; Vannelli, A. (1986). Grouping of parts and components in flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, Vol.24, N.3, pp.387-397.
- McCormick, W.T.; Schweitzer, P.J.; White, T.W. (1972). Problem decomposition and data reorganisation by a clustering technique. *Operations Research*, Vol. 20, pp. 993-1009.
- Ng, S.M. (1996). On the characterization and measure of machine cells in group technology. *Operations Research*, Vol. 44, No. 5, pp. 735-744.
- Rinnooy Kan, A.H.G. (1976). *Complexity theory. Machine scheduling problems: classification, complexity and computations*. Martinus Nijhoff, pp 45-50.
- Seifodini, H. (1989). Single linkage versus average linkage clustering in machine cell formation applications. *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 419-426.
- Shargal, M.; Shekhar, S.; Irani, S.A. (1995). Evaluation of search algorithms and clustering efficiency measures for machine-part matrix clustering. *IIE Transactions*, Vol. 27, No. 1, pp. 43-59.
- Srinivasan, G.; Narendran, T.T.; Mahadevan, B. (1990). An assignment model for the part-families problem in group technology. *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 1, pp. 145-152.
- Vakharia, A.J.; Wemmerlov, U. (1990). Designing a cellular manufacturing system. A materials flow approach based on operation sequences. *IIE Transactions*, Vol. 22, No. 1, pp. 84-97.
- Ventura, J.A.; Chen, F.F.; Wu, C.H. (1990). Grouping parts and tools in flexible manufacturing systems production planning. *International Journal of Production Research*, Vol. 28, pp. 1039-1056.
- 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.