

Diseño de Sistemas de Fabricación Reconfigurable mediante la Formación de Familias de Productos

Ricardo Galán, Jesús Racero, Ignacio Eguía, Fernando Guerrero

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

Resumen

La investigación en Sistemas de Fabricación Reconfigurable (SFR) está en sus inicios. Un SFR permite cambios en su estructura, de manera que el sistema se puede reconfigurar para la fabricación de nuevos productos de forma rápida, con alta calidad y a bajo coste. El funcionamiento de un SFR comienza con la agrupación de productos en familias. El fabricante selecciona una de las familias formadas y configura el sistema para que se pueda fabricar. Cuando se termina, se escoge una segunda familia y el sistema se reconfigura para fabricarla de forma óptima, y así sucesivamente. Por tanto, la configuración del sistema cambia cada vez que se fabrica una familia. Esta investigación se centra en el diseño de familias de productos en los SFR, y para ello se han identificado las características de los productos que hay que tener en cuenta para realizar la formación de las familias. Éstas características son la base para el desarrollo de una metodología de agrupación de productos específicamente diseñada para los SFR. Como resultado de esta metodología se obtienen varios conjuntos de familias, diferentes según la similitud de los productos que las forman.

Palabras clave: Reconfigurabilidad, familias, fabricación

1. Introducción

En la actualidad, la industria de la fabricación 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 (Tu *et al.* 2004). Esto se consigue fomentando productos y servicios de alto valor añadido mediante una personalización de productos en masa. Esta Personalización en Masa (más conocida por el término anglosajón *Mass Customisation*) es un nuevo paradigma de fabricación para la realización de productos y servicios que satisfagan las necesidades de los consumidores con la eficiencia de la fabricación en masa (Jiao *et al.* 2003). Para llevarla a la práctica, es necesario que el sistema de fabricación sea capaz de obtener una amplia variedad de productos, con cambios rápidos en los lanzamientos de los mismos al mercado, a bajo coste y con alta calidad. 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. No corren el riesgo de quedar obsoletos, ya que permiten cambiar los componentes del sistema y de módulos específicos de software. Son abiertos, por lo que pueden ser continuamente mejorados mediante la implantación de nuevas tecnologías.

También pueden ser rápidamente reconfigurados para fabricar futuros productos sin necesidad de ser reemplazados o eliminados. Un sistema de fabricación reconfigurable se diseña para un rápido ajuste de su capacidad productiva y de su funcionalidad, para responder a las necesidades del entorno, mediante el cambio o recolocación de sus componentes (Koren *et al.* 1999).

Respecto al diseño del sistema, el primer problema que se presenta es el de la formación de familias de productos. La literatura es abundante en métodos de formación y criterios de elección, sobre todo en el ámbito de la fabricación celular. Sin embargo, estos métodos y criterios no se pueden trasladar sin más a la fabricación reconfigurable, pues ésta presenta características propias, singularidades que han de tenerse en cuenta y que difieren de las características propias de la fabricación celular o de cualquier otro campo. Para ello, se tienen que definir las características fundamentales de los productos que hay que considerar para su agrupación en familias antes de desarrollar una metodología de agrupación de productos en familias para los SFR.

2. Análisis de Requisitos

Los SFR tienen como objeto la fabricación de una variedad de productos que reflejen los requerimientos del mercado. La variedad de productos se define como la diversidad de productos suministrada al mercado por un sistema productivo (Ulrich, 1995). A pesar de que la introducción de nuevos productos y su agrupamiento en familias es una respuesta legítima para dar respuesta a las necesidades del mercado, pueden existir conflictos con los requisitos de mantener alta productividad y bajo coste. Esto puede requerir una reducción en la variedad de productos. Dos conceptos importantes relacionados con la variedad de productos son la modularidad y la comunalidad (Gupta y Krishnan, 1998).

La *modularidad* describe el uso de elementos comunes para crear variedad (Huang y Kusiak, 1998), y trata de separar un sistema en módulos independientes. Así, se puede definir la modularidad como el grado en el que un producto se compone de módulos independientes que no presentan interacciones entre ellos (Gershenson *et al.*, 2003). La modularidad hace posible que las actividades de fabricación y montaje sean sencillas. La adopción de una estructura modular en los productos incrementa su adaptación a las nuevas situaciones provocadas por cambios impredecibles, a través de una actualización sencilla del hardware y software más que de una sustitución de los elementos del sistema de fabricación.

La *comunalidad* es una medida de lo bien que un producto usa componentes estándares (Martin y Ishii, 1997) con objeto de reducir el número total de componentes distintos. Un alto grado de comunalidad decreta la complejidad del sistema, los costes de set-up y la incertidumbre en las fechas de entrega; mejora la disponibilidad de material y simplifica las operaciones de planificación y secuenciación (Sheu y Wacker, 1997). La comunalidad asegura que un componente es compartido por dos o más productos de la misma familia (Rai y Allada, 2003).

Otro requisito de los productos en los SFR es la *compatibilidad* entre componentes de la misma familia. La compatibilidad se puede definir como el grado en el que diferentes productos se pueden asociar para formar una familia de productos similares.

Los distintos componentes de los SFR deben ser reusables. La *reusabilidad* es un factor económico que mide el uso de las configuraciones de diseño existentes mientras se

reconfiguran los componentes de fabricación para un nuevo tipo de producto (Abdi y Labib, 2004). La reusabilidad se puede maximizar mediante el agrupamiento de productos y su asignación a familias de productos similares.

Por último, la *demanda* de productos es otro factor importante pues los fabricantes reciben pedidos de los clientes por los productos de las familias, de forma que la fabricación de un alto volumen de algunos productos de una cierta familia puede retrasar el tiempo de entrega acordado del resto de productos de la familia (Xiaobo *et al.*, 2000). La formación de familias de productos con demanda similar conducirá a sistemas con capacidad similar.

3. Metodologías de Agrupación

La proliferación de métodos de agrupamiento de productos surgió con el desarrollo de los Sistemas de Fabricación Celulares (SFC), el primer paradigma de fabricación centrado en posibilitar la producción económica de diversos tipos de piezas. Tradicionalmente, el agrupamiento de productos en familias y la formación de células en SFC han estado estrechamente unidos. La clasificación de métodos de agrupamiento en SFC mostrada en la Figura 1 está basada en el tipo de técnica usada (Selim *et al.*, 1998).

La mayoría de los procedimientos descriptivos no son sofisticados ni precisos, pero sí son económicos (Mahesh y Srinivasan, 2002). Su uso puede ser apropiado en problemas pequeños y repetitivos, y en general no proporcionan buenas soluciones.

Los enfoques basados en programación matemática están incompletamente formulados (Selim *et al.*, 1998), los modelos son complejos desde el punto de vista computacional y es poco probable que puedan proporcionar buenas soluciones a problemas grandes.

Los métodos de agrupamiento basados en matrices logran soluciones aceptables con bajo coste computacional. Aunque se pueden conseguir matrices ordenadas por medio de estos métodos, la formación de familias disjuntas de productos no está asegurada. Además, éstos presentan la desventaja de la dependencia de la configuración inicial de la matriz (Mahesh y Srinivasan, 2002).

Los métodos de agrupamiento jerárquico aglomerativos son los más utilizados y forman grupos de elementos que poseen similitudes en algunos atributos. Los coeficientes que miden la similitud entre dos elementos se calculan a partir de la matriz de incidencia. Después, un dendograma muestra el grado de similitud para los distintos grupos de elementos. El coeficiente de similitud más importante para la formación de familias de elementos es el coeficiente de Jaccard (McAuley, 1972), que mide la similitud entre pares de productos (i, j), y se define en términos del número de máquinas que cada producto tiene que visitar. Este coeficiente (S_{ij}) se puede expresar como:

$$S_{ij} = \frac{a}{a+b+c} \quad 0 \leq S_{ij} \leq 1 \quad (1)$$

En la expresión (1), a indica el número de máquinas que visitan los productos i y j , b es el número de máquinas que visita sólo el producto i , y c es el número de máquinas que visita sólo el producto j . Por tanto, si $S_{ij}=1$ los productos son procesados por las mismas máquinas, y si $S_{ij}=0$ quiere decir que los productos los procesan máquinas distintas. Los productos que presentan una similitud elevada se agrupan juntos.

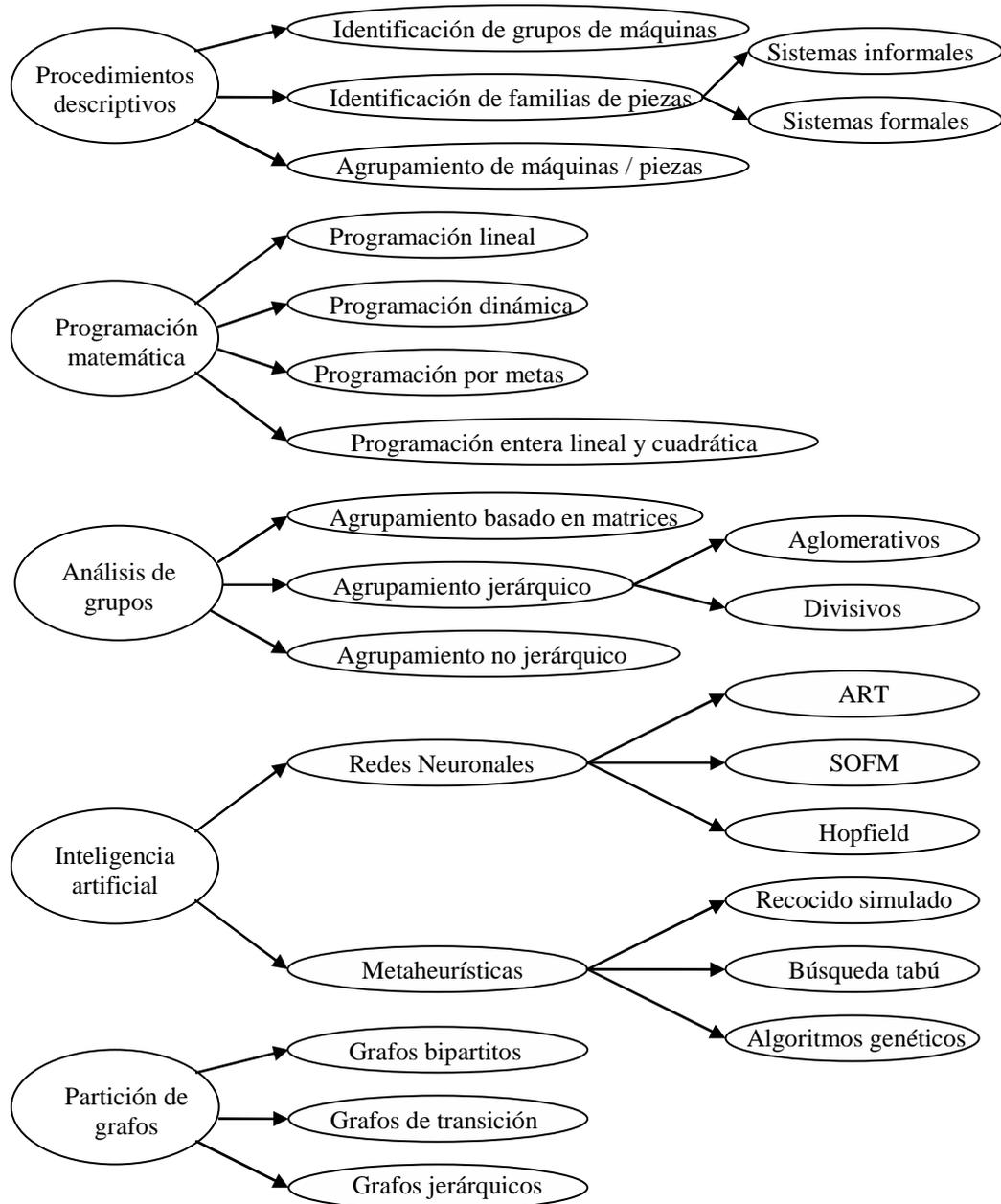


Figura 1. Clasificación de métodos para la formación de células y familias de piezas

Los algoritmos de búsqueda aleatoria como el recocido simulado, los algoritmos genéticos y las redes neuronales proporcionan soluciones que no dependen de la solución inicial, como hacen otras heurísticas, y además presentan un valor objetivo más cercano al óptimo global. Sin embargo, su aplicación puede estar lastrada por el tiempo de computación necesario para su resolución, ya que son más lentas que otros algoritmos iterativos (Singh y Rajamani, 1996).

En los enfoques basados en grafos resulta muy compleja la determinación de la máquina o componente que es cuello de botella en la identificación de grafos disjuntos. Aunque se han realizado algunos esfuerzos para solventar este problema (Lee *et al.*, 1982; Vannelli y Kumar, 1986), siguen existiendo limitaciones.

En el contexto de la formación de familias y células sólo han sido utilizadas las técnicas de agrupamiento aglomerativo (Selim *et al.*, 1998). Estas técnicas presentan un efecto cadena conocido como “*chaining*”, por el cual tienden a crear pocos grupos de muchos elementos quedando otros elementos sin unir (formando grupos compuestos de un solo elemento) (Gupta, 1991). De entre esas técnicas, el Average Linkage Clustering Algorithm (ALC) es el que presenta el efecto *chaining* en menor medida (Vakharia y Wemmerlov, 1995) y se considera como la más apropiada a aplicar.

4. Metodología Propuesta

Antes de la fabricación de distintos tipos de productos se realiza una agrupación en familias. Posteriormente estas familias se fabrican una a una para permitir que el sistema productivo incremente su reusabilidad y satisfaga las necesidades de un conjunto de clientes (Abdi y Labib, 2004).

Seguidamente se expone el desarrollo de una metodología para agrupar productos en familias en los SFR. Esta metodología está basada en los métodos aglomerativos de agrupación jerárquica y está adaptada para tener en cuenta las cinco consideraciones de los productos en SFR previamente identificadas.

4.1. Construcción de Matrices

El punto de partida para la aplicación del agrupamiento jerárquico es la formación de la matriz de incidencia producto-máquina. Esta matriz indica si un producto es procesado por una máquina o no lo es.

Durante el diseño de matrices en SFR se deben tener en cuenta varios parámetros. Éstos son la modularidad, comunalidad, compatibilidad, reusabilidad y demanda de productos, ya descritos en el apartado 2. Se necesitan matrices que indiquen, para cada par de productos a agrupar, en qué medida dichos productos son similares en términos de modularidad, de comunalidad, de compatibilidad, de reusabilidad y de demanda.

4.1.1. Matriz de Modularidad

Los productos no suelen ser unidades indivisibles que se fabrican en un solo bloque. Un producto suele estar compuesto por componentes. La modularidad trata sobre la descomposición de un producto en componentes y conjuntos de componentes (Gershenson *et al.*, 1999) y se obtiene a partir de la lista de materiales, desarrollada por el equipo de trabajo destinado al diseño del producto.

La implementación de la matriz de modularidad es un procedimiento de tres fases. En la primera fase se crea la matriz producto-componente en función de la lista de materiales. Esta matriz incluye n productos $i=(A, B, \dots n)$ y m componentes $j=(1, 2, \dots m)$ en filas y columnas respectivamente. Los valores de esta matriz (a_{ij}) son: 1 si el producto i incluye el componente j ó 0 en otro caso.

Estos valores se obtienen de la lista de materiales (BOM), que representa la estructura de producto e incluye a todos los componentes y sub-montajes que forman el producto. Para el desarrollo de la metodología propuesta no importa el nivel en el que se encuentran los

componentes en el BOM, pues todos ellos se tienen que fabricar. Del mismo modo, el número de componentes que necesita un producto no influye en el desarrollo de la metodología.

Un producto está compuesto por componentes, que pueden ser modulares (compartidos con otros productos) o singulares (exclusivos del producto). En la segunda fase se calcula el nivel de modularidad del producto, que determina el número de componentes modulares del mismo en relación al número total de componentes. Su expresión es la siguiente:

$$M_p = \frac{\psi_p}{\phi_p} \quad 0 \leq M_p \leq 1 \quad (2)$$

El nivel de modularidad del producto p (M_p) depende del número de componentes del producto p que es compartido por más productos (Ψ_p), y del número total de componentes del producto p (Φ_p).

En la tercera fase se conforma la matriz de modularidad, que está formada con las similitudes entre pares de productos. Los coeficientes de similitud se calculan mediante la siguiente expresión:

$$S_{pq} = 1 - |M_p - M_q| \quad 0 \leq S_{pq} \leq 1 \quad (3)$$

S_{pq} es la similitud entre los productos p y q . M_p y M_q son los niveles de modularidad de los productos p y q respectivamente.

4.1.2. Matriz de Comunalidad

La comunalidad es una medida de la estandarización de un producto (Sheu y Wacker, 1997). La matriz de comunalidad se puede usar para identificar a los productos que comparten ciertos componentes.

La implementación de ésta matriz se divide en dos etapas. La primera consiste en el desarrollo de una matriz producto-componente, definida en el apartado 4.1.1. En la segunda etapa, se calculan los coeficientes de similitud (mediante el coeficiente de Jaccard) entre pares de productos en función de los componentes que ambos productos tienen en común. La matriz de comunalidad se completa llevando estos resultados a una matriz cuadrada.

4.1.3. Matriz de Compatibilidad

La compatibilidad es una medida del grado en el que productos diferentes se pueden unir para formar una familia de productos. Se puede calcular mediante una matriz que represente la compatibilidad de cada producto frente a los demás.

La compatibilidad se puede clasificar en dos grupos: compatibilidad tecnológica y de mercado. La compatibilidad tecnológica se refiere a las similitudes técnicas entre los productos, los cuales comparten algunas operaciones como las de fabricación o montaje. La compatibilidad de mercado se refiere a la combinación de productos en familias para responder a las necesidades de un determinado mercado (Singhal y Singhal, 2002).

La compatibilidad se puede calcular por medio de dos matrices, una que mide la compatibilidad tecnológica y otra que mide la compatibilidad de mercado. Las matrices se obtienen a partir de las sugerencias de equipos funcionales formados por expertos y consumidores, y pueden ser desarrolladas de forma secuencial o simultánea. La matriz de compatibilidad tecnológica debe ser diseñada por un equipo de expertos en las distintas etapas del sistema productivo (fabricación, montaje, etc.). La matriz de compatibilidad de mercado debe ser desarrollada por un equipo compuesto por expertos en mercadotecnia (personal de ventas, distribuidores, minoristas, etc.) y por consumidores.

Las matrices son cuadradas y representan en filas y columnas los productos. Respecto a los valores de los coeficientes de las matrices, 0 indica una incompatibilidad total entre los pares de productos comparados y 1 indica compatibilidad total. Los equipos de trabajo pueden no ser capaces de clasificar todos los pares de productos en compatibles o incompatibles, por lo que se necesitan medidas entre 0 y 1 .

4.1.4. Matriz de Reusabilidad

La reusabilidad trata, a nivel de producto, sobre el uso de componentes de productos actuales en la fabricación de un nuevo tipo de producto. Con esto, la reusabilidad se maximiza cuando todos los componentes de un determinado producto se usan para la fabricación del siguiente producto.

La implementación de la matriz de reusabilidad es un procedimiento de tres etapas. En la primera etapa se conforma la matriz producto-componente de la misma forma que en las matrices de modularidad y comunalidad, es decir, relacionando productos con sus componentes.

En la segunda etapa se forma una matriz compuesta únicamente por productos. Los coeficientes de esta matriz se refieren a la reusabilidad entre pares de productos p y q , cuando el producto q se fabrica justo después de haber sido fabricado el producto p , y se calculan mediante la siguiente expresión:

$$R_{pq} = \frac{\gamma_{pq}}{\lambda_p} \quad 0 \leq R_{pq} \leq 1 \quad (4)$$

La reusabilidad entre los productos p y q (R_{pq}) depende del número de componentes del producto p compartidos con el producto q (γ_{pq}), y del número total de componentes del producto p (λ_p). Nótese que $R_{pq} \neq R_{qp}$ cuando los productos están compuestos por distinto número de componentes.

En la matriz de reusabilidad, R_{pq} y R_{qp} deben ser iguales. Consecuentemente, la tercera etapa consiste en calcular los coeficientes de la matriz de reusabilidad (Λ_{pq}) como la media aritmética de los pares de productos, siempre que $R_{pq} \neq R_{qp}$:

$$\Lambda_{pq} = \frac{R_{pq} + R_{qp}}{2} \quad 0 \leq \Lambda_{pq} \leq 1 \quad (5)$$

4.1.5. Matriz de Demanda

Para conseguir una configuración homogénea del sistema de fabricación, sus elementos constituyentes deben tener una capacidad productiva similar. Asimismo, para lograr una configuración del sistema efectiva en términos de coste, la capacidad del sistema debería tener la mayor tasa de utilización posible. Por tanto, se necesita una agrupación de productos que posean demandas similares, de manera que se pueda conseguir un sistema de fabricación formado por máquinas de capacidad similar. Los valores de interacción entre los productos p y q se calculan como sigue:

$$D_{pq} = 1 - \frac{|d_p - d_q|}{d_{\max} - d_{\min}} \quad 0 \leq D_{pq} \leq 1 \quad (6)$$

Donde D_{pq} es la interacción entre los productos p y q , d_p y d_q son la demanda de los productos p y q , $d_{\max} = \max\{d_1 \dots d_p \dots d_q \dots d_n\}$ y $d_{\min} = \min\{d_1 \dots d_p \dots d_q \dots d_n\}$.

Nótese que $D_{pq} \in (0,1)$ donde 0 quiere decir que similitud entre ambos productos en función de la demanda es mínima (son los que tienen más y menos demanda) y 1 quiere decir que ambos productos tienen la misma demanda.

4.2. Métodos de Pesos

Los métodos de agrupamiento jerárquico parten de una matriz única que incluye los valores de interacción entre los productos. Por tanto, es necesario disponer de una sola matriz que incluya a todos los valores de las matrices desarrolladas anteriormente, una por cada requisito identificado. Este problema de decisión multicriterio es posible solventarlo mediante el uso de técnicas de peso.

El propósito de las técnicas de pesos es la asignación de valores a un conjunto de objetivos o criterios para indicar su importancia relativa (Hajkiewicz *et al.*, 2000). El objetivo es formar familias de productos similares en términos de modularidad, comunalidad, compatibilidad, reusabilidad y demanda. Los pesos dados a cada uno de estos requisitos indicarán la importancia de ellos.

Uno de los métodos más conocidos es el Proceso Jerárquico Analítico (*Analytic Hierarchy Process*, AHP) propuesto por Saaty (1980). La importancia de los distintos criterios se evalúa en una escala 1-9, donde 1 indica que ambos criterios son igual de importantes y 9 indica que el primero es absolutamente más importante que el segundo. Posteriormente, el método calcula los autovalores para representar los pesos de los criterios. El método AHP es muy utilizado y ha dado buenos resultados en su aplicación en distintos ámbitos, por lo que se considera válido para la obtención de la matriz de pesos.

En el caso que aquí se presenta, el objetivo es la obtención de pesos para cada una de las cinco características básicas de los productos. Esto se debe a que en determinados casos se prefieren formar, por ejemplo, familias de productos que tengan alta modularidad sin importar su demanda. Por otro lado, para aplicar el método de agrupación ALC, se necesita una única matriz cuyos valores resuman los pesos de cada una de las características de los productos.

Según la metodología AHP, los cinco criterios a evaluar son las características de los productos identificadas anteriormente: modularidad, comunalidad, compatibilidad, reusabilidad y demanda.

4.3. Aplicación de la Metodología de Agrupación

Una vez que todos los requisitos de los productos están representados en una sola matriz puede comenzar la implementación de la metodología ALC. Este método comienza con la agrupación de los coeficientes de mayor similitud. De esta forma se crea una sub-matriz que considera a los productos agrupados como una familia. Entonces se recalculan las similitudes entre productos (y sus agrupaciones) mediante la siguiente expresión:

$$S_{ij} = \frac{\sum_{m \in i} \sum_{n \in j} S_{mn}}{N_i \cdot N_j} \quad (7)$$

Donde i, j son familias; m, n son elementos de las familias i y j , respectivamente; S_{ij} el coeficiente de similitud entre las familias i y j ; S_{mn} el coeficiente de similitud entre los elementos m y n ; N_i, N_j el número de elementos en las familias i y j , respectivamente.

Este procedimiento se repite hasta que todos los productos estén agrupados en la misma familia. Como resultado, se obtiene un dendograma o estructura de árbol invertido. La selección de familias puede realizarse desde el dendograma. En éste se diferencian varios niveles, que hacen referencia a las distintas familias de productos que se pueden formar.

5. Conclusiones

En el método de agrupación ALC usado en Tecnología de Grupos, la selección de las familias estaba determinada por dos costes: el que se incurre cuando un producto no puede ser fabricado dentro de su célula de fabricación y el derivado por los costes de una máquina dentro de una célula que no puede fabricar un producto de su familia asociada. En el diseño de los SFR, esta selección depende de otros factores que deben ser estudiados.

La elección de uno u otro conjunto de familias desde el dendograma depende de los costes de implantación de cada una de ellas. La identificación de dichos costes es esencial para el diseño de sistema productivo. Debido a la dificultad de esta elección, el desarrollo de un modelo matemático para el problema se considera fundamental.

Agradecimientos

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

Referencias

- Abdi, M.R.; Labib, A.W. (2004). Grouping and selecting products: the design key of Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs). *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 3, pp. 521-546.
- Gershenson, J.K.; Prasad, G.J.; Allamneni, S. (1999). Modular product design: a life-cycle view. *Journal of Integrated Design and Process Science*, Vol. 3, No. 4, pp. 13-26.
- Gershenson, J.K.; Prasad, G.J.; Zhang, Y. (2003). Product modularity: definitions and benefits. *Journal of Engineering Design*, Vol. 14, No. 3, pp. 295-313.

- Gupta, S.; Krishnan, V. (1998). Product family-based assembly sequence design methodology, *IIE Transactions*, Vol. 30, pp. 933-945.
- Gupta, T. (1991). Clustering algorithms for the design of a cellular manufacturing system - an analysis of their performance. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 461-468.
- Hajkovicz, S.A.; McDonald, G.T.; Smith, P.N. (2000). An evaluation of multiple objective decision support weighting techniques in natural resource management. *Journal of Environmental Planning and Management*, Vol. 43, No. 4, pp. 505-518.
- Huang, C.; Kusiak, A. (1998). Modularity in design of products and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, Vol. 8, No. 1, pp. 66-77.
- Jiao, J.; Ma, Q.; Tseng, M.M. (2003). Towards high value-added products and services: mass customization and beyond. *Technovation*, Vol. 23, pp. 809-821.
- 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.
- Lee, J.L.; Vogt, W.G.; Mickle, M.H. (1982). Calculation of shortest paths by optimal decomposition. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 12, pp. 410-415.
- Mahesh, O.; Srinivasan, G. (2002). Incremental cell formation considering alternative machines. *International Journal of Production Research*, Vol. 40, No. 14, pp. 3291-3310.
- Martin, M.; Ishii, K. (1997). Design for Variety: Development of complexity indices and design charts. *ASME Design Engineering Technical Conferences, DETC97 / DFM-4359*.
- McAuley, J. (1972). Machine grouping for efficient production. *The Production Engineer*, Feb., 53-57.
- Rai, R.; Allada, V. (2003). Modular product family design: agent-based Pareto-optimization and quality loss function-based post-optimal analysis. *International Journal of Production Research*, Vol. 41, No. 17, pp. 4075-4098.
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.
- Selim, H.M.; Askin, R.G.; Vakharia, A.J. (1998). Cell formation in group technology: review, evaluation and directions for future research. *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 3-20.
- Sheu, C.; Wacker, J.G. (1997). The effects of purchased parts commonality on manufacturing lead time. *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 17, No. 8, pp. 725-745.
- Singh, N.; Rajamani, D. (1996). *Cellular Manufacturing Systems: design, planning and control*. Chapman & Hall.
- Singhal, J.; Singhal, K. (2002). Supply chains and compatibility among components in product design. *Journal of Operations Management*, Vol. 20, pp. 289-302.
- Tu, Q.; Vonderembse, A.; Ragu-Nathan, T.S.; Ragu-Nathan, B. (2004). Measuring modularity-based manufacturing practices and their impact on mass customization capability: A customer-driven perspective. *Decision Sciences*, Vol. 35, No. 2, pp. 147-168.
- Ulrich, K.T. (1995). The role of product architecture in the manufacturing firm. *Research Policy*, Vol. 24, No. 3, pp. 419-440.
- Vakharia, A.J.; Wemmerlov, U. (1995). A comparative investigation of hierarchical clustering techniques and dissimilarity measures applied to the cell formation problem. *Journal of Operations Management*, Vol. 13, pp. 117-138.
- 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.