

Artículo

Metodología de distribución de plantas en ambientes de agrupación celular

Cielo Pantoja^a, Juan Pablo Orejuela^b y Juan José Bravo^{b,*}^a Investigadora, Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad del Valle, Cali, Colombia^b Profesor Asociado, Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad del Valle, Cali, Colombia

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 17 de septiembre de 2016

Modificado el 21 de enero de 2017

Aceptado el 28 de marzo de 2017

Códigos JEL:

C61

Palabras clave:

Distribución de plantas

Tecnología de grupos

Manufactura flexible

RESUMEN

Este artículo propone una metodología para la distribución de plantas en sistemas de manufactura flexible, basada en métodos cuantitativos para agrupación de familias, formación de células de manufactura y el uso de técnicas multicriterio. Respecto a la agrupación de productos, se consideraron criterios geométricos y se usó un modelo *p*-mediana modificado para la creación de células. De esta forma, la distribución de planta apropiada se escogió utilizando el proceso analítico jerárquico, evaluando diferentes alternativas obtenidas con el modelo *Quadratic Assignment Problem*, que considera el número deseado de células a formar y los coeficientes de similitud empleados para la agrupación celular. La metodología propuesta se probó a través de un caso real, verificándose la conveniencia del procedimiento en una empresa colombiana del sector metalmeccánico.

© 2017 Publicado por Elsevier España, S.L.U. en nombre de Universidad ICESI. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Plant layout methodology in cellular manufacturing systems

ABSTRACT

This article proposes a plant layout methodology for flexible manufacturing systems, based on quantitative methods used to clustering product families, manufacturing cell formation and finally using multicriteria techniques. Fore product clustering, geometric criteria were taken into account and a modified *p*-median model was used for the formation of cells. Thus, the appropriate layout of facilities was chosen using the Analytic Hierarchy Process, evaluating different alternatives obtained from the *Quadratic Assignment Problem* model, which takes into account the desired number of cells to be created and the similarity coefficients used for cell clustering. The proposed methodology was tested through an actual case, being verified the suitability of the procedure in a Colombian company from the metalworking sector.

© 2017 Published by Elsevier España, S.L.U. on behalf of Universidad ICESI. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

JEL classification:

C61

Keywords:

Plant layout

Cluster technology

Flexible manufacturing

* Autor para correspondencia. Universidad del Valle, Calle 13 No 100-00, Edificio 357, Oficina 2007-2, Cali, Colombia.
Correo electrónico: juan.bravo@correounivalle.edu.co (J.J. Bravo).

A metodologia de distribuição de plantas em ambientes de agrupação celular

R E S U M O

Classificações JEL:
C61

Palavras-chave:
Distribuição de plantas
Tecnologia de grupos
Fabricação flexível

Este artigo propõe uma metodologia para a distribuição de plantas em sistemas de fabricação flexível baseada em métodos quantitativos para a agrupação de famílias, a formação de células de fabrico e a utilização de técnicas multicritério. Em relação à agrupação de produto, foram considerados critérios geométricos e foi usado um modelo de p-meio modificado para a criação de células. Assim, a distribuição apropriada de planta foi escolhida utilizando o Processo Analítico Hierárquico avaliando diferentes alternativas obtidas com o modelo de Quadratic Assignment Problem, que leva em consideração o número de células desejado de células para formar e os coeficientes de similaridade utilizados para a agrupação celular. A metodologia proposta foi testada através de um caso real verificando-se a adequação do procedimento em uma empresa colombiana do sector metalúrgico.

© 2017 Publicado por Elsevier España, S.L.U. em nome de Universidad ICESI. Este é um artigo Open Access sob uma licença CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

En mercados que exigen gran competitividad, la administración de los negocios se enfrenta a decisiones y problemas que deben resolverse de manera estratégica para el mantenimiento exitoso de las compañías. Entre esas decisiones es de gran relevancia el satisfacer las necesidades de los clientes externos en cuanto a la calidad del producto y al servicio, siendo el cumplimiento en las entregas un elemento de gran impacto (Davis-Sramek, Mentzer y Stank, 2008).

El cumplimiento en las entregas se asocia en gran medida a la organización de los procesos de manufactura, que a su vez contribuye a la mejor utilización de recursos de una planta. Una de las herramientas para la mejora de los procesos es la planificación del *layout*, con la cual se pueden mejorar los tiempos de producción, la productividad y la eficiencia, pudiéndose además disminuir los costos de manejo de materiales (Drira, Pierreval y Hajri-Gabouj, 2007).

Debido a la flexibilidad que requieren los mercados actuales, que tienen gran variedad de productos y bajos volúmenes de producción, se aplica ampliamente la filosofía de la manufactura celular y flexible (Mahdavi, Teymouria, Baher y Kayvanfar, 2013; Dixit y Gupta, 2013), la cual permite agrupar un número de piezas comunes para procesarlas en una célula compuesta de las máquinas necesarias para producirlas. En especial, se aplica en sectores como el metalmeccánico, utilizando la distribución celular, lo que le permite mejorar la eficiencia de los procesos (Wemmerlov y Johnson, 1997).

Los entornos metalmeccánicos son regularmente del tipo *Job Shop* y pueden contar con gran número de máquinas y gran variedad de productos que se caracterizan por tener diferentes rutas de paso, aspecto que dificulta el acomodar las máquinas en un orden específico de flujo. Esto obliga a preguntarse dónde ubicar cada máquina teniendo en cuenta que puede ser usada por distintos productos, con diferentes rutas y demandas. Lo anterior conlleva un problema de localización de máquinas, problema que tradicionalmente se ha resuelto con métodos heurísticos y exactos, donde uno de los más conocidos es el *Quadratic Assignment Problem* (QAP) (Koopmans y Beckmann, 1957; Liggett, 2000). Según Liggett (2000), el QAP tiene una alta complejidad que puede desencadenar infactibilidades y altos tiempos computacionales. Es por ello que las agrupaciones de productos y de máquinas, previo al uso del QAP, representan estrategias de disminución de complejidad.

En este artículo se presenta una metodología para distribución en planta útil en ambientes de manufactura flexible, siendo posible trabajar con un gran número de máquinas, factor que usualmente incrementa la complejidad haciendo difícil el uso aislado del

algoritmo QAP, que ha demostrado ser No Polinomial-duro (NP-duro) en cuanto a su complejidad (Cela, 2013), requiriéndose en este caso nuevas estrategias de solución. Por lo tanto, se propone una estrategia metodológica novedosa, agrupando primero las máquinas mediante un modelo p-mediana modificado, ajustando el modelo p-mediana tradicional de Kusiak (1987), para luego aplicar el QAP a un problema más reducido.

El p-mediana modificado propuesto, que es distinto al formulado por Won y Lee (2004), permite agrupar más de una misma máquina en una célula o grupo, y el agrupamiento está influenciado por distintos coeficientes de similaridad (Yin y Yasuda, 2006). El presente artículo muestra por primera vez un proceso de solución en cascada, donde con cada coeficiente de similaridad se obtiene, a través del modelo p-mediana modificado propuesto, un nuevo agrupamiento, y cada agrupamiento alimenta el algoritmo QAP que arroja una configuración óptima de máquinas. Las configuraciones así obtenidas, cambiando el coeficiente de similaridad, son comparadas y rankeadas con el método multicriterio *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (Yang y Kuo, 2003; Hadi-Vencheh y Mohamadghasemi, 2013), para finalmente decidir por la mejor distribución de la planta.

En la literatura revisada sobre metodologías de distribución en planta no se ha encontrado una asociación similar a la antes presentada entre un método multicriterio y el QAP con un enlace con el modelo p-mediana modificado desarrollado, y para ello se puede revisar, por ejemplo, a Yang y Kuo (2003), Yang y Hung (2007a), Salazar, Vargas, Añasco y Orejuela (2010) y Karande y Chakraborty (2014).

Dado lo anterior, el artículo se esquematiza de la siguiente manera: la sección 2 explica de manera ampliada el esquema metodológico elegido, en la sección 3 se explica el p-mediana modificado, y la sección 4 explica el método QAP y el método multicriterio. La sección 5 presenta los resultados de la aplicación de la metodología propuesta en un caso de estudio real, y la sección 6 muestra las conclusiones.

2. Metodología

Se propone una metodología basada en la combinación de varios métodos que abordan de manera jerárquica y concatenada una serie de subproblemas asociados a la elección de la mejor distribución de planta. La figura 1 esboza la estrategia metodológica general.

Teniendo como referente de un sistema de manufactura flexible a cualquier empresa del sector metalmeccánico, se tiene que ellas manejan grandes cantidades de ítems, y por ello se establece conveniente empezar por hacer un primer tipo de agrupamiento de

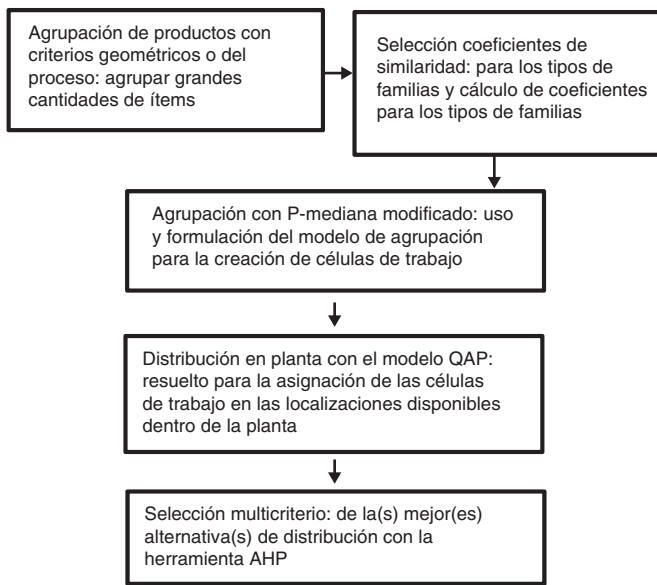


Figura 1. Metodología propuesta. Fuente: elaboración propia.

los productos «por criterios geométricos» (Kusiak, 1987). Esto tiene como finalidad hacer un agrupamiento preliminar, reduciendo el número de ítems para facilitar los posteriores desarrollos numéricos con los modelos p-mediana y QAP. Este primer agrupamiento consideró los siguientes criterios:

- o Geometría de las piezas: tamaño, forma, etc.
- o Funciones de los componentes: mango, abrazadera, etc.
- o Según el tipo de fabricación: tamaño del lote, ruta del proceso, etc.
- o Material de la pieza.

Partiendo de la agrupación hecha en el paso anterior se seleccionaron los coeficientes de similitud teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- o Coeficientes que según el estado del arte tuvieran mayor aplicación en la tecnología de grupos.
- o Usar coeficientes de similitud basados en las tablas de contingencia (Warrens, 2008), las cuales tienen la estructura mostrada en la tabla 1.
- o Se incluyeron además coeficientes basados en distancia (Selim, Askin y Vakharia, 1998) y otros de asociación para poder hacer un estudio comparativo.

Considerando la tabla 1, puede decirse que en los modelos más comunes los coeficientes de similitud se calculan sobre caracteres de dos estados, cada uno de los cuales se registra como 1 o 0 (presencia o ausencia), donde *a* es el número de productos que tienen operaciones en ambas máquinas, *b* es el número de productos presentes en la máquina «i» pero no «j», *c* es el número de productos presentes en la máquina «j» pero no «i», y *d* es el número de

Tabla 1
Estructura de tablas de contingencia

		Máquina j	
		1	0
Máquina i	1	a	b
	0	c	d

Fuente: adaptado de Warrens (2008).

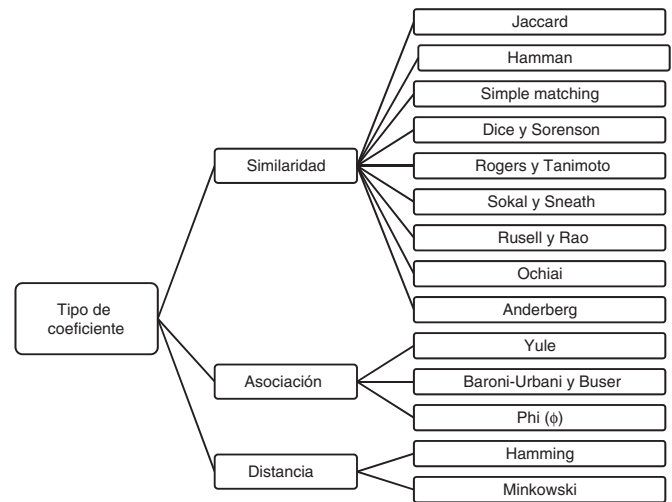


Figura 2. Tipo de coeficientes. Fuente: elaboración propia.

productos ausentes en ambas máquinas. Algunos de las expresiones de los coeficientes elegidos se muestran a continuación, y para mayor información pueden verse las investigaciones de Yin (2006) y Warrens (2008):

$$\text{Coeficiente de Jaccard (Sneath)} : S_j = \frac{a}{a + b + c} \tag{1}$$

$$\text{Coeficiente de Dice y Sorensen} : S_D = \frac{2a}{2a + b + c} \tag{2}$$

$$\text{Coeficiente de similitud de Ochiai} : S_s = \frac{(a + d)}{\sqrt{(a + b)(a + c)}} \tag{3}$$

$$\text{Coeficiente de Anderberg} : S_D = \frac{a}{a + 2(b + c)} \tag{4}$$

$$\text{Coeficiente de Rogers y Tanimoto} : S_{R\&T} = \frac{(a + d)}{a + 2(b + c) + d} \tag{5}$$

Los coeficientes de similitud finalmente seleccionados se muestran en la figura 2, y se calcularon según sus fórmulas existentes. Es claro que la elección de alguno de ellos puede inducir un distinto agrupamiento de las máquinas, y en ese sentido se empleó el modelo p-mediana para cada coeficiente, arrojando en cada caso agrupamientos de máquinas que serían luego aprovechados por el procedimiento basado en el QAP de distribución de planta.

3. Modelo p-mediana modificado

Partiendo del modelo p-mediana de Kusiak (1987) se propone un modelo con una función objetivo flexible, la cual maximiza la similitud o minimiza la distancia, dependiendo del coeficiente de la figura 2 que se utilice. Se elabora y propone entonces un modelo p-mediana modificado que posee características deseables y ajustadas al sector en estudio.

Dadas las características del sector es posible que se cuente con varias máquinas del mismo tipo, esto debido a que cuando se desea incrementar capacidad en algún cuello de botella, estos incrementos se planifican a mediano plazo, se hacen de manera discreta y se logran generalmente comprando más máquinas de la misma clase. En el modelo propuesto se asume que existe un límite superior e inferior de máquinas de cada tipo, permitiendo que un tipo de máquina se pueda asignar a más de una célula. Esto implica cambiar el modelo original de Kusiak, modificando la primera restricción y adicionando una restricción que involucre los límites mencionados, tal como se verá a continuación.

Índices y parámetros del modelo modificado:

- o i, j = índices de máquinas.

Parámetros:

- o N = número de máquinas en la planta.
- o P = límite de células a formar.
- o $DIST_{ij}$ = medida de distancia entre las máquinas i y j .
- o SIM_{ij} = medida de similaridad entre las máquinas i y j .
- o U_i = máquinas disponibles del tipo i .

Variable de decisión:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si la máquina } i \text{ se asigna a la célula } j. \\ 0, & \text{de lo contrario.} \end{cases}$$

Función objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_{i \in \text{Máquina}} \sum_{j \in \text{Máquina}} DIST_{ij} * A_{ij} \quad (6)$$

$$\text{Max } Z = \sum_{i \in \text{Máquina}} \sum_{j \in \text{Máquina}} SIM_{ij} * A_{ij} \quad (7)$$

Restricciones:

$$\sum_{j \in \text{Máquina}} A_{ij} \leq U_i \quad \forall i \in \text{Máquina} \quad (8)$$

$$\sum_{j \in \text{Máquina}} A_{ij} \geq 1 \quad \forall i \in \text{Máquina} \quad (9)$$

$$\sum_{j \in \text{Máquina}} A_{ij} = P \quad (10)$$

$$A_{ij} \leq A_{ji} \quad \forall i, j \in \text{Máquina} \quad (11)$$

$$A_{ij} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad \forall i, j \in \text{Máquina} \quad (12)$$

Las expresiones (6) y (7) representan la función de desempeño la cual puede ser distancia (6) o similaridad (7), según sea el tipo de coeficiente de similaridad que esté evaluándose. La desigualdad (8) garantiza que el total de máquinas de un mismo tipo no supere el número total máximo de máquinas de ese tipo, mientras que la ecuación (9) garantiza que al menos se asigne una máquina de cada tipo en el sistema. La ecuación (10) restringe el número de células a abrir, y la (11) condiciona a que solo se puedan asignar máquinas a células abiertas. Finalmente, la ecuación (12) define la variable. Hay que tener en cuenta que el modelo aquí presentado es distinto a la propuesta de [Won y Lee \(2004\)](#), quienes en contraste consideran que una máquina solo puede asignarse a una sola célula.

4. Uso del Quadratic Assignment Problem (QAP) y selección multicriterio

Dependiendo de la función de desempeño (similaridad o distancia) y el valor de p empleado en el modelo de p -mediana modificado, se genera una distribución de planta a través del modelo QAP ([Drira et al., 2007](#)), resultando al final múltiples distribuciones de planta, una para cada coeficiente y para cada valor de p que se elija considerar. Finalmente, estas posibles distribuciones se priorizan con el método multicriterio AHP.

En el modelo QAP empleado, se asume que cada localización tiene la capacidad suficiente para albergar cualquiera de las células; sin embargo, en caso contrario se adiciona una restricción de capacidad para cada localización.

Índices y parámetros del QAP:

- o f_{mn} es el flujo de la célula m a la n .
- o d_{kl} es la distancia de Manhattan del centroide de la localización k al de la localización l .

Variables:

$$x_{mk} = \begin{cases} 1 & \text{la célula } m \text{ se asigna a la localización } k \\ 0 & \text{la célula } m \text{ no se asigna a la localización } k \end{cases}$$

Función objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_{m=1}^n \sum_{n=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{mn} d_{kl} x_{mk} x_{nl} \quad (13)$$

Restricciones:

$$\sum_{k=1}^n x_{mk} = 1 \quad \forall m \in \text{Célula} \quad (14)$$

$$\sum_{m=1}^n x_{mk} = 1 \quad \forall k \in \text{Localización} \quad (15)$$

$$x_{mk} \in \{0, 1\} \quad \forall m \in \text{Célula}, k \in \text{Localización}.$$

La función objetivo (13) del QAP define la distribución de planta óptima, para cada agrupación, de acuerdo al criterio de «costo de manejo de materiales» (CMM). Sin embargo, la elección de la mejor distribución debería considerar, según la literatura, múltiples criterios, tal como se presentan en [Altuntas, Selim y Dereli \(2014\)](#), [Chiang, Kouvelis y Urban \(2006\)](#), [Hosseini y Seifbarghy \(2016\)](#), [Karande y Chakraborty \(2014\)](#), [Matai \(2015\)](#), [Raman, Nagalingam y Lin \(2009\)](#); [Salazar et al. \(2010\)](#), [Saraswat, Venkatadri y Castillo \(2015\)](#), [Xu, Liu y Lei \(2016\)](#), [Yang y Hung \(2007b\)](#), [Yang y Kuo \(2003\)](#), entre otros. En este artículo se propone escoger la mejor alternativa a través de cinco criterios seleccionados de la literatura, uno de los cuales es el CMM aportado por el QAP. Los otros cuatro criterios fueron ([Yin, 2006](#)) y serán utilizados en el AHP:

- o Elementos excepcionales (EE): se refiere al número de movimientos intercelulares.
- o Índice de capacidad de agrupación (ICG): es una formulación obtenida de restar a una eficiencia máxima del 100%, la relación de elementos excepcionales frente a todos los procesos de los productos ([Yin, 2006](#)).
- o Porcentaje de utilización de las máquinas (UM) ([Miltenburg y Zhang, 1991](#)): es el promedio global de la utilización de las células.
- o Proximidad del espacio (PR): es el indicador que calcula la eficiencia de la distribución en planta teniendo en cuenta los costos de los viajes en vacío, el flujo de material, el flujo de información y el flujo de personal, según [Raman, Nagalingam y Chiu \(2005\)](#).

De esta forma, la ecuación (14) garantiza que toda célula sea asignada a solo una localización, la ecuación (15) garantiza que toda localización tenga asignada una y solo una célula.

5. Caso de estudio y análisis de resultados

La metodología se validó en una compañía del sector metalme-cánico especializada en autopartes metalme-cánicas. El portafolio actual de productos de la compañía seleccionada es de 30.000 ítems creados y sus procesos principales son corte, conformado, perforación, tratamiento térmico, acabado y lijado. La cantidad de máquinas disponibles de cada tipo (U), el tiempo necesario en cada operación, el tiempo de proceso (t . proc.) y la capacidad unitaria por

Tabla 2
Características de capacidad de las máquinas/procesos comunes

Máquina n.º	Cantidad máquinas (U)	t. proc. [min]	Cap. [u/min]	Cap. tot. [u/min]
1	4	2,04	0,48	1,95
2	4	1,48	0,67	2,69
3	1	1,65	0,60	0,60
4	1	1,65	0,60	0,60
5	4	1,21	0,82	3,29
6	1	15,00	0,06	0,06
7	1	0,89	1,11	1,11
8	4	0,90	1,09	4,39
9	4	0,85	1,17	4,69
10	4	1,59	0,62	2,50
11	1	1,03	0,96	0,96
12	1	1,94	0,51	0,51
13	1	1,94	0,51	0,51
14	1	15,00	0,06	0,06
15	1	1,78	0,56	0,56

Fuente: elaboración propia.

máquina (Cap.) y la del total de máquinas (cap. tot.), se muestran en la *tabla 2*.

La planta tiene un espacio disponible de 2.286 m². Las células creadas (el parámetro p del modelo p-mediana) deben ser como mínimo igual a 2 para que la filosofía de la estructura celular tenga sentido y como máximo 5 por disponibilidad actual de espacio. Teniendo en cuenta las características del caso de estudio, a continuación se desarrolla la metodología antes propuesta.

5.1. Agrupación con criterios geométricos o de su proceso de fabricación

De los 30.000 ítems creados se seleccionaron los ítems «activos» o cuya demanda en el último año hubiese sido mayor a cero, quedando elegidos 3.787 productos. Los productos que seguían el mismo proceso de fabricación se agruparon, obteniendo 120 familias.

Tabla 3
Alternativas de agrupación como entrada al modelo de distribución en planta

Opciones de p	Alternativa n.º	Coefficientes asociados	Opciones de p	Alternativa n.º	Coefficientes asociados	
2	1	Jaccard, Dice, Ochiai, Anderberg	4	27	Rogers y Tanimoto	
	2	Hamann, Rogers y Tanimoto		28	Sokal	
	3	Yule		29	Rusell	
	4	Simple, Sokal		30	Baroni	
	5	Russell		31	Phi	
	6	Baroni		32	Ochiai	
	7	Phi		33	Anderberg	
	3	8	Hamming, Minkowsky	5	34	Hamming, Minkowsky
		9	Jaccard		35	Jaccard
		10	Hamann		36	Hamann
		11	Yule		37	Yule
		12	Simple		38	Simple
		13	Dice		39	Dice
		14	Rogers y Tanimoto		40	Rogers y Tanimoto
		15	Sokal		41	Sokal
		16	Rusell		42	Rusell
		17	Baroni		43	Baroni
		18	Phi		44	Phi
19		Ochiai	45		Ochiai	
20	Anderberg	46	Anderberg			
4	21	Hamming, Minkowsky	5	47	Hamming, Minkowsky	
	22	Jaccard				
	23	Hamann				
	24	Yule				
	25	Simple				
	26	Dice				

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4
Resultados coeficiente de similaridad de Jaccard para la alternativa 1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3	0,0	0,0	0,2
3	0,0	0,3	1	0,0	0,2	0,0	0,4	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,0	0,2
4	0,0	0,1	0,0	1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1
5	0,0	0,2	0,2	0,2	1	0,0	0,3	0,2	0,3	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
7	0,0	0,4	0,4	0,2	0,3	0,1	1	0,3	0,2	0,1	0,1	0,4	0,2	0,0	0,2
8	0,0	0,2	0,2	0,1	0,2	0,0	0,3	1	0,2	0,0	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0
9	0,0	0,1	0,2	0,1	0,3	0,0	0,2	0,2	1	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1
11	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	1	0,0	0,4	0,0	0,1
12	0,0	0,3	0,3	0,2	0,4	0,0	0,4	0,2	0,2	0,1	0,0	1	0,0	0,0	0,1
13	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,1	0,4	0,0	1	0,0	0,4
14	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1	0,0
15	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,4	0,0	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5
Resultados coeficiente de Rogers y Tanimoto para la alternativa 27

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1,0	0,5	0,4	0,6	0,5	0,8	0,0	0,5	0,6	0,8	0,7	0,4	0,6	0,9	0,6
2	0,5	1,0	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,3	0,5	0,5
3	0,4	0,4	1,0	0,3	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
4	0,6	0,4	0,3	1,0	0,5	0,6	0,1	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,7	0,5
5	0,5	0,4	0,4	0,5	1,0	0,5	0,2	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,4
6	0,8	0,4	0,4	0,6	0,0	1,0	0,1	0,5	0,5	0,7	0,7	0,4	0,5	0,9	0,6
7	0,0	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	1,0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,0	0,1
8	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,2	1,0	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,6	0,4
9	0,6	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,1	0,5	1,0	0,6	0,5	0,5	0,4	0,6	0,4
10	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,1	0,5	0,6	1,0	0,7	0,4	0,6	0,8	0,6
11	0,7	0,4	0,4	0,5	0,5	0,7	0,1	0,5	0,5	0,7	1,0	0,4	0,8	0,8	0,6
12	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4	1,0	0,3	0,5	0,4
13	0,6	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5	0,1	0,4	0,4	0,6	0,8	0,3	1,0	0,6	0,8
14	0,9	0,5	0,4	0,7	0,6	0,9	0,0	0,6	0,6	0,8	0,8	0,5	0,6	1,0	0,7
15	0,6	0,5	0,4	0,5	0,4	0,6	0,1	0,4	0,4	0,6	0,6	0,4	0,8	0,7	1,0

Fuente: elaboración propia.

5.2. Agrupamientos celulares obtenidos variando los coeficientes de similaridad y los valores de p

La tabla 3 muestra las alternativas de agrupamiento celular arrojadas por el modelo p-mediana modificado, obtenidas combinando los valores de p y los coeficientes de la figura 2. Se obtuvieron en algunos casos agrupaciones (o células) idénticas con distintos coeficientes. Por ejemplo, para la alternativa 1 de la tabla 3, la conformación de las células fue igual para los coeficientes de Jaccard, Dice, Ochiai y Andeberg, y otras, como la 27 con el coeficiente de

Rogers y Tanimoto, tuvieron una única agrupación. Fueron en total 47 agrupamientos diferentes.

Los coeficientes de similaridad se calcularon teniendo en cuenta las tablas de contingencia. Como ejemplo se muestra el resultado del coeficiente de Jaccard para la alternativa 1 (tabla 4) y el de Rogers y Tanimoto para la alternativa 27 (tabla 5).

En la tabla 6 se muestra como ejemplo el agrupamiento obtenido con el modelo p-mediana modificado usando el coeficiente de Jaccard, para los diferentes p.

Tabla 6
Células creadas con el modelo p-mediana modificado usando el coeficiente de Jaccard (1: asignada; 0: no asignada)

p	p=2		p=3			p=4				p=5				
	C1	C2	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4	C5
1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
4	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1
11	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
12	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
13	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
14	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
15	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7
Vector de prioridad de criterios

Criterios	Vector de prioridad para criterios
Elementos excepcionales (EE)	0,049
ICG	0,124
% Utilización de las máquinas (UM)	0,286
Costo de manejo de materiales (MHC)	0,455
Closeness Gap (CG)	0,086

Fuente: elaboración propia.

5.3. Obtención de las distribuciones de planta con el modelo Quadratic Assignment Problem (QAP) y selección multicriterio Analytic Hierarchy Process (AHP)

El modelo QAP se resolvió en el software AMPL[®] para las distintas alternativas de células, arrojando 47 alternativas diferentes de distribución en planta. La [tabla 7](#) muestra el vector de prioridad de criterios que se obtuvo considerando el concepto de los expertos al interior de la empresa objeto de estudio, con una consistencia de 0,056.

Adicionalmente, se realizó la matriz de comparación de las alternativas para cada criterio, obteniéndose las ponderaciones que se muestran en la [tabla 8](#).

Tabla 8
Resultados de los indicadores por alternativa

No.	EE (%)	GCI (%)	UM (%)	MHC (%)	CG (%)	No.	EE (%)	GCI (%)	UM (%)	MHC (%)	CG (%)
1	3,97	2,45	2,87	13,74	2,39	25	2,54	2,35	1,91	1,62	0,53
2	0,69	1,73	2,17	1,13	2,42	26	2,12	2,29	1,72	1,65	0,86
3	2,02	2,27	1,89	1,22	2,59	27	1,35	2,10	2,09	14,67	1,07
4	3,97	2,45	1,97	1,37	2,39	28	3,97	2,45	1,97	1,97	0,36
5	5,08	2,50	2,02	1,18	2,92	29	2,54	2,35	2,08	1,91	0,41
6	7,06	2,54	1,89	1,19	2,76	30	3,53	2,43	1,81	1,59	0,47
7	2,65	2,02	2,39	1,17	2,74	31	0,71	1,59	2,28	1,43	2,39
8	1,11	1,98	2,87	1,11	6,44	32	2,54	2,35	2,08	1,91	0,41
9	1,25	2,05	1,95	1,64	3,53	33	1,67	2,22	1,83	1,53	0,68
10	1,25	2,05	2,17	1,73	3,53	34	0,55	1,30	7,82	1,28	1,57
11	0,70	1,68	2,39	1,68	3,33	35	1,79	2,25	2,93	1,71	1,40
12	2,08	2,29	1,54	1,44	1,96	36	1,14	1,99	1,18	2,10	1,50
13	2,05	2,28	1,72	1,46	3,67	37	0,54	1,63	2,02	1,62	1,78
14	1,09	1,97	1,94	1,39	3,48	38	1,74	2,22	1,68	1,78	1,64
15	1,10	1,97	1,94	1,39	3,48	39	1,51	2,16	1,81	1,75	1,62
16	3,97	2,45	1,84	1,40	2,40	40	0,89	1,90	2,09	1,47	2,33
17	3,63	2,44	1,67	1,34	2,38	41	2,31	2,32	1,67	1,95	1,57
18	1,32	1,89	1,79	1,41	3,26	42	2,54	2,35	2,08	2,33	2,04
19	2,54	2,35	1,96	1,74	3,29	43	2,76	2,37	1,81	1,72	1,54
20	2,49	2,34	1,77	1,49	2,41	44	2,05	2,23	1,89	1,92	2,39
21	0,67	1,53	1,41	1,11	3,58	45	2,49	2,34	1,83	1,92	2,42
22	2,76	1,98	2,92	1,81	0,95	46	2,15	2,30	1,83	1,92	2,44
23	1,13	1,99	1,21	1,71	0,38	47	0,49	1,13	2,79	1,92	0,81
24	1,49	2,14	2,47	1,47	1,49						

Fuente: elaboración propia.

Tabla 9
Número de células y distribución de las alternativa 1 y 27

Loc. célula	Alternativa 1. Jaccard, Dice, Ochiai, Anderberg							Loc. célula	Alternativa 27. Rogers y Tanimoto								
	1	2	3	4	5	6	7		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0	6	0	0	0	0	1	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	7	0	0	0	0	0	1	0	0	0
								8	0	0	0	0	0	0	0	1	0
								9	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Fuente: elaboración propia.

Con el vector de prioridad para los criterios y los resultados de la priorización de alternativas por criterio, se obtiene la priorización de alternativas mostradas en la [figura 3](#). Las mejores alternativas son las números 1 y 27, cuya diferencia porcentual es mínima. En cuanto al número de células a formar en el espacio disponible, se deben tomar como mejores distribuciones las número 1 y 27.

En la [tabla 9](#) se presenta la formación de las células para las dos mejores alternativas y el proceso de asignación de QAP para estas.

La alternativa 1 presenta levemente mejores características frente a la 27 debido a que salen menos los ítems de una célula hacia otra con esta configuración. Adicionalmente, el índice de capacidad de agrupación es mayor para este caso. Es decir, las alternativas 1 y 27 son las que tienen el mayor porcentaje en el costo de manejo de materiales (MHC) con valores de 13,74 y de 14,67, respectivamente, siendo este el criterio con más peso en el porcentaje de prioridad, con un valor de 45,5%. El siguiente criterio en importancia es el porcentaje de utilización de máquinas, con un peso porcentual de 28,6%, en el que la alternativa 1 toma 2,87% y la 27 toma 2,09%. El criterio GCI, tercero en importancia, tiene un peso de 12,4%, donde la alternativa 1 presenta un valor del 2,45% y la 27 con el 2,10%.

Si bien es cierto que la alternativa 1 es más costosa en el manejo de materiales, lo cual le da una ponderación menor en ese indicador, los otros indicadores la favorecen con respecto a la alternativa 27. Es claro que si el proceso de toma de decisiones se basa solo en

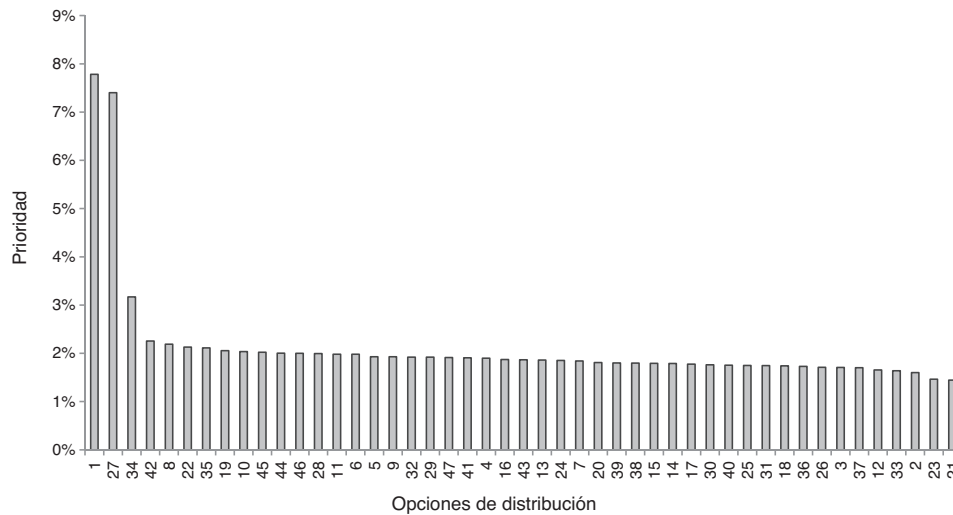


Figura 3. Priorización de las alternativas.
Fuente: elaboración propia.

criterio del costo de manejo de materiales, entonces la alternativa 1 no sería seleccionada. La estrategia multicriterio empleada no solo permite seleccionar dicha alternativa, sino que también ofrece todo un ranking para todas, lo cual brinda una mejor información en el proceso de toma de decisiones.

6. Conclusiones

El presente artículo propone una metodología que combina la agrupación de productos en familias, el uso de un modelo p-mediana modificado asociado al uso de coeficientes de similaridad para el agrupamiento de máquinas en células, el empleo del QAP y el uso del AHP para definir la distribución de planta óptima, procedimiento útil en sistemas de manufactura flexible con múltiples ítems y múltiples máquinas. Según la revisión de literatura, se identifica esta combinación metodológica como única, y se pudo comprobar la viabilidad de su implementación en un caso real relacionado con una empresa metalmecánica del sector autopartes. La complejidad del caso analizado se pudo abordar satisfactoriamente con la combinación de las técnicas empleadas, dejando un precedente importante para el sector económico analizado, pudiéndose usar estrategias computacionales de fácil implementación y solución. Esto es de significativa importancia conociendo la complejidad que implica el implementar el QAP en casos de tamaño real como el estudiado. Sin embargo, es necesario complementar los análisis realizando variaciones a los parámetros de los modelos empleados.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Agradecimientos

El presente trabajo ha recibido el apoyo de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad del Valle.

Bibliografía

- Altuntas, S., Selim, H. y Dereli, T. (2014). A fuzzy DEMATEL-based solution approach for facility layout problem: A case study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(5-8), 749–771. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-5826-3>
- Cela, E. (2013). *The Quadratic Assignment Problem: Theory and Algorithms*. New York: Springer Science & Business Media.

- Chiang, W. C., Kouvelis, P. y Urban, T. L. (2006). Single- and multi-objective facility layout with workflow interference considerations. *European Journal of Operational Research*, 174(3), 1414–1426. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.007>
- Davis-Sramek, B., Mentzer, J. T. y Stank, T. P. (2008). Creating consumer durable retailer customer loyalty through order fulfillment service operations. *Journal of Operations Management*, 26, 781–797.
- Dixit, A. R. y Gupta, M. (2013). Current status, enablers and barriers of implementing cellular manufacturing system in Indian industries. *Advances in Manufacturing*, 1(4), 346–356.
- Drira, A., Pierreval, H. y Hajri-Gabouj, S. (2007). Facility layout problems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 31(2), 255–267.
- Hadi-Vencheh, A. y Mohamadghasemi, A. (2013). An integrated AHP-NLP methodology for facility layout design. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(1), 40–45.
- Hosseini, S. S. y Seifbarghy, M. (2016). A novel meta-heuristic algorithm for multi-objective dynamic facility layout problem. *RAIRO-Operations Research*, 50(4-5), 869–890. <http://dx.doi.org/10.1051/ro/2016057>
- Karande, P. y Chakraborty, S. (2014). *A facility layout selection model using MACBETH method*. Bali, Indonesia: Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (January 7-9).
- Koopmans, T. C. y Beckmann, M. (1957). Assignment problems and the location of economic activities. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 25(1), 53–76.
- Kusiak, A. (1987). The generalized group technology concept. *International Journal of Production Research*, 25(4), 561–569.
- Liggett, R. S. (2000). Automated facilities layout: Past, present and future. *Automation in Construction*, 9, 197–215.
- Mahdavi, I., Teymourian, E., Baher, N. T. y Kayvanfar, V. (2013). An integrated model for solving cell formation and cell layout problem simultaneously considering new situations. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(4), 655–663.
- Matai, R. (2015). Solving multi objective facility layout problem by modified simulated annealing. *Applied Mathematics and Computation*, 261, 302–311. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2015.03.107>
- Miltenburg, J. y Zhang, W. (1991). A comparative evaluation of nine well-known algorithms for solving the cell formation problem in group technology. *Journal of Operations Management*, 10(1), 44–72.
- Raman, D., Nagalingam, S. y Chiu, W. (2005). *A fuzzy rule based system to measure facility layout flexibility*. ICPR-18 Conference Proceedings of the 18th International Conference on Production Research - The Networked Enterprise: A Challenge for a Sustainable Development. pp. 1–5. Italy: University of Salerno.
- Raman, D., Nagalingam, S. V. y Lin, G. C. I. (2009). Towards measuring the effectiveness of a facilities layout. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(1), 191–203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2007.06.003>
- Salazar, A. F., Vargas, L. C., Añasco, C. E. y Orejuela, J. P. (2010). Propuesta de distribución en planta bietapa en ambientes de manufactura flexible mediante el proceso analítico jerárquico. *Revista EIA*, 7(14), 161–175.
- Saraswat, A., Venkatadri, U. y Castillo, I. (2015). A framework for multi-objective facility layout design. *Computers & Industrial Engineering*, 90, 167–176. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2015.09.006>
- Selim, H. M., Askin, R. G. y Vakharia, A. J. (1998). Cell formation in group technology: Review, evaluation and directions for future research. *Computers & Industrial Engineering*, 34(1), 3–20.
- Warrens, M. J. (2008). *Similarity Coefficients for Binary Data: Properties of Coefficients, Coefficient Matrices, Multi-Way Metrics and Multivariate Coefficients*. Psychometrics and Research Methodology Group, Leiden University Institute for Psychological Research, Faculty of Social Sciences, Leiden University.

- Wemmerlov, U. y Johnson, D. J. (1997). Cellular manufacturing at 46 user plants: Implementation experiences and performance improvements. *International Journal of Production Research*, 35(1), 29–49.
- Won, Y. y Lee, K. C. (2004). Modified p-median approach for efficient GT cell formation. *Computers & Industrial Engineering*, 46(3), 495–510.
- Xu, J., Liu, Q. y Lei, X. (2016). A fuzzy multi-objective model and application for the discrete dynamic temporary facilities location planning problem. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(3), 357–372. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2014.897974>
- Yang, T. y Hung, C.-C. (2007). Multiple-attribute decision making methods for plant layout design problem. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(1), 126–137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2005.12.002>
- Yang, T. y Kuo, C. (2003). A hierarchical AHP/DEA methodology for the facilities layout design problem. *European Journal of Operational Research*, 147(1), 128–136. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00251-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00251-5)
- Yang, T. y Hung, C. C. (2007). Multiple-attribute decision making methods for plant layout design problem. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(1), 126–137.
- Yin, Y. (2006). Application Similarity Coefficient Method to Cellular Manufacturing. En V. Kordic, A. Lazinica, y M. Merdan (Eds.), *Manufacturing the Future, Concepts - Technologies - Visions* (pp. 95–258). Alemania: InTech.
- Yin, Y. y Yasuda, K. (2006). Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: A taxonomy and review. *International Journal of Production Economics*, 101(2), 329–352.