

Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA O
DESENHO DE CÉLULAS DE MANUFATURA EM PEQUENAS E MÉDIAS
EMPRESAS

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A METHODOLOGY FOR THE
DESIGN OF CELLS MANUFACTURING IN SMALL AND MEDIUM
ENTERPRISES

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA EL
DISEÑO DE CELDAS DE MANUFACTURA EN PYMES

Francisco Herrera Rodríguez¹

José Fidel Torres Delgado²

RESUMO: Esta pesquisa desenvolve uma metodologia que consiste em três fases que podem ser implementadas por pequenas e médias empresas (PME). A primeira fase aloca as máquinas na fabricação de células, a segunda fase aloca uma distribuição das máquinas em cada uma de suas respectivas células de trabalho, ea última fase encontra o layout ótimo das células no interior da planta de produção. Esta metodologia é implementada em problemas previamente expostos na literatura, obtendo assim soluções ótimas para 80% de problemas de pequeno porte e para 33% de problemas de médio porte. Da mesma forma, é implementado com sucesso em uma empresa de setor real colombiano dedicada ao fabricação de produtos naturais. Finalmente, uma análise de sensibilidade é realizada nos parâmetros envolvidos no problema de setor real para entender como a informação afeta consideravelmente a solução obtida e quais são as implicações para a empresa. Uma vez implementada a metodologia proposta e após a realização da análise de sensibilidade, verifica-se que a melhor configuração da planta sob o foco de células de manufatura reduz em aproximadamente 63% dos custos associados ao movimentação de materiais associados sobre o custo atual configuração, o que representa uma economia anual de USD \$ 13,000.

Palavras chaves: Células de manufatura, tecnologia de célula, configuração da planta, Layout, setor real da Colômbia.

ABSTRACT: This research develops a methodology that consists of three phases that can be implemented by small and medium companies (SME's). The first phase allocates the machines in cells manufacturing, the second one makes the layout of the machines in each of

¹ Universidad de los Andes, Bogotá/Colombia. hr.francisco10@uniandes.edu.co

² Universidad de los Andes, Bogotá/Colombia. ftorres@uniandes.edu.co

their respective working cells and the last phase find the optimal layout of cells in the production plant. This methodology is implemented in problems previously discussed in the literature, thereby obtaining optimal solutions for 80% of small size problems and for 33% of medium-sized problems. Similarly, it is implemented successfully in a real sector Colombian company dedicated to the development and marketing of natural products. Finally, it makes a sensitivity analysis of the parameters involved in real problem to understand how information affects considerably the solution obtained and what the implications for the company are. Once implemented the proposed methodology and after performing sensitivity analysis is found that the best plant configuration under the focus of manufacturing cells reduces approximately 63% of the costs associated with material handling regarding the current layout of the company, which represents an annual savings of USD \$ 13,000.

Keywords: Cell manufacturing, Cellular technology, Plant configuration, Layout, Colombian real sector.

RESUMEN: Este trabajo de investigación desarrolla una metodología compuesta por tres fases que puede ser implementada por las empresas pymes. La primera fase agrupa las máquinas en celdas de manufactura, la segunda asigna una distribución de las máquinas en cada una de sus respectivas celdas de trabajo y la última fase permite encontrar la distribución óptima de las celdas dentro de la planta de producción. Dicha metodología es implementada en problemas expuestos previamente en la literatura obteniendo soluciones óptimas en el 80% de los problemas pequeños y en el 33% de los problemas medianos. Asimismo es implementada satisfactoriamente en una empresa del sector real colombiano dedicada a la elaboración de productos naturales. Finalmente, se hace un análisis de sensibilidad a los parámetros que intervienen en la solución del problema real para entender qué información afecta de manera considerable la solución obtenida y sus repercusiones en la empresa. Una vez implementada la metodología propuesta y después de realizado el análisis de sensibilidad, se encuentra que la mejor configuración bajo el enfoque de celdas de manufactura reduce en un 63% el costo asociado al manejo de materiales respecto a la configuración actual, lo que representa un ahorro anual cercano a USD \$ 13,000.

Palabras clave: Celdas de manufactura, Tecnología celular, Distribución de planta, Layout, Sector real colombiano.

1 INTRODUCCIÓN

La formación de celdas busca agrupar en un sitio de trabajo definido (celda) varias máquinas que procesen productos con características similares (familias de productos), de tal manera que se logre reducir el costo asociado al movimiento de materiales dentro de una planta de producción. El problema de formación de celdas ha sido ampliamente estudiado en la literatura, aproximadamente desde la década de 1970 cuando los sistemas de producción en el mundo comenzaron a cambiar y no se requería un gran volumen de productos que tuvieran las mismas características, sino por el contrario, se necesitaban productos con mayor variedad respecto a su forma, tamaño, color, funcionalidad etc.

Sin embargo, después de una revisión de literatura es importante resaltar que a partir de la revisión del estado del arte hecha por Ghosha, Senguptaa, Chattopadhyayb y Dana (2011) se pudo inferir que para la solución del problema de celdas de manufactura solamente alrededor del 5% tiene en cuenta el problema de layout (distribución de planta) y aproximadamente el 10% utiliza alguna instancia (problema) real.

Debido a las razones expuestas anteriormente, el presente trabajo de investigación busca desarrollar una metodología que permita la formación de celdas de manufactura para cualquier empresa pyme, teniendo en cuenta la distribución tanto de las máquinas como de las celdas dentro de una planta de producción. Dicha metodología se llevará a cabo resolviendo problemas expuestos previamente en la literatura y se aplicará también en una empresa del sector real colombiano.

Por último, se busca hacer un análisis de sensibilidad a los parámetros que intervienen en la solución del problema real, de tal forma que se pueda entender qué información afecta de manera considerable la solución obtenida y qué repercusiones tendría para la empresa.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A lo largo de las últimas décadas, se han realizado diferentes estudios que por medio de diversas técnicas (métodos de observación directa, programación matemática, métodos heurísticos, entre otros) buscan dar solución a la agrupación de las máquinas en celdas de manufactura.

2.1 Literatura sobre el problema de formación de celdas

De acuerdo al enfoque que se pretende dar a este trabajo, la revisión bibliográfica se ha dividido en dos partes, la primera aborda las diferentes técnicas que se han estudiado para la formación de celdas, se pretende revisar si se tiene en cuenta dentro de su solución el layout y la clase de instancias (problemas) que se usaron, es decir si son problemas reales o adaptados de la literatura (teóricos).

Tabla 1. Resumen revisión literatura problema formación de celdas

Referencia	Técnica	Etapas	Layout	Función Objetivo	Instancias
(PURCHECK, 1974)	Procedimiento descriptivo	Sí	No	Maximizar utilización de celdas	Real
(SRINIVASAN; NARENDRAN, 1991)	Análisis de clúster	No	No	Minimizar número de elementos excepcionales	Teóricas
(FERREIRA; PRADIN, 1993)	Partición gráfica	Sí	No	Minimizar movimientos entre celdas	Teóricas
(RAJA; ANBUMALAR, 2014)	Uso del algoritmo CLASSPAVI	Sí	Sí	Minimizar movimiento entre celdas y dentro de la celda	Teóricas
(KHILWANI; ULUTAS; ATILA; TIWARI, 2011)	Análisis jerárquico	No	No	Maximizar índice de similaridad	Teóricas
(OUK; BAEK, J-C; BAEK, J-K, 2004)	Algoritmo heurístico	Sí	No	Minimizar disimilaridad	Teóricas
(MAHDAVI; TEYMOURIAN; BAHER; KAYVANFAR, 2013)	Programación matemática	No	Sí	Minimizar costo inter e intra celdas y elementos excepcionales	Teóricas
(WU; CHU; WANG; YAN, 2007)	Algoritmo genético	No	Sí	Minimizar costo inter e intra celdas	Teóricas
(PAPAIIOANNOU; WILSON, 2012)	Programación lineal Tabu Search	No	No	Minimizar costo set-up y movimiento intercelular	Teóricas

2.2 Literatura sobre la distribución de planta

La segunda parte de la revisión bibliográfica aborda las diferentes técnicas que se han usado para la solución del problema de layout o distribución de planta, teniendo en cuenta si se toma el enfoque de solución de single row facility layout problem (SRFLP) que busca ubicar las máquinas, departamentos, estaciones, puestos de trabajo (facilities, en inglés) en una línea recta o multi row facility layout problem (MRFLP) que busca ubicar dichas facilities en varias líneas.

Tabla 2. Resumen revisión de literatura problema layout

Referencia	Técnica	Clase	Función Objetivo	Instancias
(PALUBECKIS, 2015)	Algoritmo búsqueda local	Single row	Minimizar costo de desplazamiento	Teóricas
(HERAGU; ALFA, 1992).	Simulated Annealing	Single / Multi row	Minimizar costo de desplazamiento	Teóricas
(AMARAL, 2006)	Programación matemática	Single row	Minimizar distancia departamento	Teóricas
(HUNGERLÄNDER, 2014)	Programación semidefinida	Single row	Minimizar costo de material	Teóricas
(HERAGU; KUSIAK, 1991)	Programación matemática	Single row / Multi row	Minimizar costo de transporte	Teóricas
(SOLIMANPUR; VRAT; SHANKAR, 2005)	Colonia de hormigas	Single row	Minimizar distancia total	Teóricas – Reales
(KAKU; THOMPSON; BAYBARS, 1988)	Programación matemática	Multi row	Minimizar movimientos entre pisos	Teóricas
(CHAE; PETERS, 2006)	Programación matemática	Multi row	Minimizar la distancia total	Teóricas
(HERAGU, 2006)	Programación matemática	Single row / Multi row	Minimizar costo de desplazamiento	Real

3 MODELO INTEGRADO DE TRES FASES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE CELDAS DE MANUFACTURA

De acuerdo a la conclusión que se llegó a partir de la información encontrada en el artículo de Ghosha, Senguptaa, Chattopadhyayb y Dana (2011) sobre la revisión del estado del arte para los problemas de celdas de manufactura en las que aproximadamente sólo el 5% tiene en cuenta el problema de layout dentro de su solución y después de la revisión de literatura, se decidió desarrollar una metodología de tres fases que permita diseñar las celdas de manufactura, que tenga en cuenta la distribución de las máquinas dentro de las celdas y también la distribución de las celdas dentro de la planta de producción.

3.1 Fase uno: Conformación de celdas

Para la conformación de celdas se toma como base el modelo desarrollado por Papaioannou y Wilson. (2012) el cual presenta los siguientes supuestos: La secuencia que sigue cada parte para ser procesada por las máquinas debe seguir estricto orden, se debe tener una cantidad mínima y máxima de máquinas por cada celda, el costo del set-up de las máquinas del tipo i es el mismo para todas sus k -ésimas máquinas y por último, se conoce de antemano la demanda y los tiempos de procesamiento para formar la matriz $UTIL_{ij}$.

Minimizar

$$\sum_{j=1}^{NP} \sum_{q=1}^{NC} M_{jq} w_{jq} + \sum_{i=1}^{NM} \sum_{j=1}^{NP} SETUP_{ij} \sum_{q=1}^{NC} s_{ijq} + \sum_{q=1}^{NC} \sum_{j=1}^{NP} \sum_{z=1}^{ZTYPES_j} A_j extra_{qj_{jz}}$$

Sujeto a:

$$\sum_{q=1}^{NC} y_{ikq} = 1 \quad \forall i, k \quad (1)$$

$$\sum_{q=1}^{NC} x_{ijq} = UTIL_{ij} \quad \forall i, j \quad (2)$$

$$x_{ijq} \leq s_{ijq} \quad \forall i, j, q \quad (3)$$

$$x_{ijq} \geq (UTILMIN) (s_{ijq}) \quad \forall i, j, q \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^{NP} x_{ijq} \leq \sum_{k=1}^{KM_i} y_{ikq} \quad \forall i, q \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{NM} \sum_{k=1}^{KM_i} y_{ikq} \leq (v_q) Emax \quad \forall q \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{NM} \sum_{k=1}^{KM_i} y_{ikq} \geq (v_q) Emin \quad \forall q \quad (7)$$

$$x_{ijq} \leq w_{jq} (UTIL_{ij}) \quad \forall i, j, q \quad (8)$$

$$x_{ijq} \leq xx_{ijq} (UTILMAX) \quad \forall i, j, q \quad (9)$$

$$x_{ijq} \geq xx_{ijq} (UTILMIN) \quad \forall i, j, q \quad (10)$$

$$xx_{L_{jz}jq} + xx_{L_{jr}jq} - \sum_{zz=z+1}^{r-1} xx_{L_{jzz}jq} \leq extra_{qjL_{jz}} + 1 \quad \forall q, j, z, r \quad (11)$$

$$v_{q+1} \leq v_q \quad \forall q \quad (12)$$

$$\sum_{q=1}^{NC} (q) y_{ikq} \leq \sum_{q=1}^{NC} (q) y_{ik+1} \quad \forall i, k \quad (13)$$

$$y_{ikq}, v_q, w_{jq}, extra_{qjL_j}, xx_{ijq} = 0 \text{ o } 1; 0 \leq x_{ijq} \leq 1; s_{ijq} > 0 \quad (14)$$

El modelo busca minimizar el número de distintas celdas usadas por cada parte, el número de veces que una parte revisita una celda, de esta manera se minimiza el transporte intercelular y el costo de set-up cuando se asignan partes para ser procesadas por las

máquinas. Para ver la funcionalidad de las restricciones ver Papaioannou y Wilson (2012, p. 5). Este modelo se implementó en 20 problemas estudiados previamente en la literatura en un computador Intel Core i5 con 4Gb de RAM y 2.2 GHz en Gurobi en el ambiente de trabajo Enthought Canopy. Se obtuvieron soluciones óptimas para el 80% de las instancias teóricas pequeñas y 33% de las medianas con tiempos de ejecución satisfactorios. Los resultados se presentan en la tabla 3:

Tabla 3. Instancias usadas para la implementación de la metodología de tres fases

Fuente	Tamaño	Partes	Celdas	Total máquinas	E _{max}	Gap (%)	Función Objetivo (USD\$)	Tiempo de ejecución (seg)
(SANKARAN; KASILINGAM, 1993)	Pequeña	8	4	10	6	<u>Óptimo</u>	233,9	0,59
(FOULDS; FRENCH; WILSON, 2006)	Pequeña	10	4	20	6	<u>Óptimo</u>	219,63	1,72
(CHANDRASEKHARA ; RAGAGOPALAN, 1986)	Pequeña	20	5	31	7	3,33	410,85	>12.000
(ONWUBOLU, 1998)	Pequeña	10	4	13	8	<u>Óptimo</u>	189,44	0,3
(KING; NAKORNCHAI, 1982)	Pequeña	15	5	25	7	<u>Óptimo</u>	304	71,37
(ASKIN; SELIM; VAKHARIA, 1997)	Mediana	19	5	40	9	6,42	464	>12.000
(DE WITTE, 1980)	Mediana	19	5	29	7	<u>Óptimo</u>	480,08	7021,9
(STANFEL, 1985)	Mediana	24	5	37	8	<u>Óptimo</u>	430,77	2001,83
(ASKIN; CRESSWELL; GOLDBERG; VAKHARIA, 1991)	Mediana	24	5	45	10	<u>Óptimo</u>	468,95	134,28
(CHAN; MILNER,1982)	Mediana	10	5	30	7	<u>Óptimo</u>	305,69	151,8
(VENUGOPAL; NARENDRAN, 1992)	Mediana	30	7	89	13	8,91	789,87	>12.000
(BURBIDGE, 1989)	Mediana	43	8	61	10	4,53	881,51	>12.000
(ASKIN; CRESSWELL; GOLDBERG; VAKHARIA, 1991)	Mediana	43	9	65	11	2,58	801,09	>12.000
(BOE; CHENG, 1991)	Mediana	35	7	64	11	4,53	489,65	>24.000
(KUMAR; KUSIAK; VANNELLI, 1986)	Mediana	20	6	42	8	11,3	665,25	>24.000
(ADIL; RAJAMANI; STRONG, 1997)	Mediana	37	8	64	10	4,07	608,62	>12.000
(MCCORMICK; SCHWEITZER; WHITE, 1972)	Mediana	27	8	76	10	24,8	993,09	>24.000
(STANFEL, 1985)	Grande	50	8	99	13	5,88	982,85	>12.000
(VANNELLI; KUMAR, 1986)	Grande	90	10	147	17	14,2	1794,11	>24.000
(JAGANATHAN, 2007)	Grande	19	10	139	15	63,4	1032,8	>100.000

3.2 Fase dos: Distribución de las máquinas dentro de las celdas

La fase de distribución de las máquinas dentro de las celdas toma como base el modelo de Heragu (2006, pág 222), este modelo es muy util porque la distribución que propone es muy flexible y se puede adaptar de una línea recta a una línea en forma de “U” o “L”, de acuerdo a las necesidades de espacio de la empresa. El modelo presenta los siguientes supuestos: Se deben conocer con anterioridad las posiciones relativas de las máquinas (todas van a estar dispuestas a lo largo), las máquinas tienen forma rectangular, el modelo es equivalente a una línea recta (SRFLP), el movimiento del material ocurre en una dirección predefinida, la distancia se calcula rectilínea entre los centros de las máquinas y si existe flujo entre la máquina i y la máquina j, para todas las k-ésimas máquinas de tipo i generadas en la fase 1, el flujo f_{ij} se reparte equitativamente.

Minimizar

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} f_{ij} h_{ij}$$

Sujeto a:

$$h_{ij} + M(1 - y_{ij}) \geq x_j - x_i \quad \forall i, j \leq n \quad i \neq j \quad (1)$$

$$h_{ij} + My_{ij} \geq L - (x_i - x_j) \quad \forall i, j \leq n \quad i \neq j \quad (2)$$

$$x_i - x_j + My_{ij} \geq d_{ij}^- \quad \forall i, j \leq n \quad i \neq j \quad (3)$$

$$-x_i + x_j - My_{ij} \geq d_{ij}^- + M \quad \forall i, j \leq n \quad i \neq j \quad (4)$$

$$x_i - x_j - My_{ij} \leq d_{ij}^+ \quad \forall i, j \leq n \quad i \neq j \quad (5)$$

$$-x_i + x_j + My_{ij} \leq d_{ij}^+ + M \quad \forall i, j \leq n \quad i \neq j \quad (6)$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, h_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \leq n \quad i \neq j \quad (7)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \leq n \quad (8)$$

El modelo busca minimizar el costo total de manejo de material. Las restricciones 1 y 2, aseguran la ubicación de cada máquina. Si la máquina i está antes de la j, obliga a que la restricciones 1 y 2 se cumplan. Las restricciones 3 y 4 proveen límite inferior a la distancia entre las máquinas i, j, las restricciones 5 y 6, proveen límite superior a la distancia entre las máquinas i, las 7 y 8 determinan el tipo de variable. Este modelo se implementó satisfactoriamente (con tiempos de ejecución aceptables y encontrando el óptimo) solamente en las instancias en las que se obtuvo el óptimo en la fase 1.

3.3 Fase tres: Conformación de celdas

Para esta fase se puede usar el modelo de la fase anterior si la planta de producción solo tiene un piso (SRFLP), sin embargo, se debe considerar la opción que alguna empresa tenga dos pisos por lo que es conveniente usar un enfoque multi-row (MRFLP), debido a esta razón se propone el siguiente modelo tomado de Heragu (2006, pág 225). El modelo presenta los siguientes supuestos: Se deben conocer con anterioridad las posiciones relativas de las celdas (todas van a estar dispuestas a lo largo), las celdas tienen forma rectangular, el movimiento del material ocurre en una dirección predefinida, la distancia se calcula rectilínea entre los centros de las celdas y se deben conocer con anterioridad las adyacencias de las celdas.

Minimizar

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} f_{ij} (x_{ij}^+ + x_{ij}^- + y_{ij}^+ + y_{ij}^-)$$

Sujeto a:

$$x_i - x_j = x_{ij}^+ - x_{ij}^- \quad \forall i, j \leq n \quad i \neq j \quad (1)$$

$$y_i - y_j = y_{ij}^+ - y_{ij}^- \quad \forall i, j \leq n \quad i \neq j \quad (2)$$

$$L_i^l \leq (x_i^u - x_i^d) \leq L_i^u \quad \forall i \leq n \quad (3)$$

$$W_i^l \leq (y_i^u - y_i^d) \leq W_i^u \quad \forall i \leq n \quad (4)$$

$$P_i^l \leq 2(x_i^u - x_i^d + y_i^u - y_i^d) \leq P_i^u \quad \forall i \leq n \quad (5)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad \forall i \leq n \quad (6)$$

$$y_i^l \leq y_i \leq y_i^u \quad \forall i \leq n \quad (7)$$

$$x_i - x_j \geq x_i^u - x_j^l - (x_j^u - x_j^l) \quad \forall i, j \in HA \quad (8)$$

$$y_i - y_j \geq y_i^u - y_j^l - (y_j^u - y_j^l) \quad \forall i, j \in VA \quad (9)$$

$$x_i^l \geq x_j^u \quad \forall i, j \in VA \quad (10)$$

$$y_i^l \geq y_j^u \quad \forall i, j \in HA \quad (11)$$

$$x_i, y_i, x_i^l, y_i^l, x_i^u, y_i^u \geq 0 \quad \forall i \leq n \quad (12)$$

El modelo busca minimizar el costo total de movimiento de material entre cada par de celdas. Las restricciones 1 y 2, mantienen la linealidad del modelo, las restricciones 3,4 y 5 aseguran que la celda se encuentren entre los límites de longitud, anchura y perímetro respectivamente, las restricciones 6 y 7 aseguran que el centro de la celda se encuentre dentro de los límites en el eje x y y, respectivamente, las restricciones 8, 9, 10 y 11 aseguran las

adyacencias. La restricción 12, determina el tipo de variable. Este modelo se implementó satisfactoriamente (con tiempos de ejecución aceptables y encontrando el óptimo) solamente en las instancias en las que se obtuvo el óptimo en la fase 1.

4 APLICACIÓN A UNA EMPRESA DEL SECTOR REAL (PROPUESTA 1)

Para aplicar la metodología presentada se selecciona un laboratorio que se dedica a la fabricación y comercialización de productos naturales que tienen como finalidad la prevención y el tratamiento de enfermedades. En este momento el laboratorio es una empresa pyme que tiene siete años de presencia en el sector colombiano y que se encuentra en planes de expansión. Al implementar la metodología propuesta en cada una de las fases se obtiene el resultado óptimo con tiempos de ejecución satisfactorios (menores a 10 segundos), la distancia total y el costo asociado al manejo de materiales se presentan a continuación.

Tabla 4. Resultados de la configuración de la propuesta 1

Configuración	Total distancia (metros/mensual)	Total costo manejo de material (USDS/mensual)	Reducción (%)
Actual	149.200	1.750	N/A
Propuesta 1	59.218	693	60,31

Como se puede apreciar en la tabla 3, los resultados representan una reducción del 60,31% de los costos asociados al manejo de materiales respecto a la distribución que tiene la empresa actualmente, lo que implicaría una reducción anual cercana a los USD \$ 12.500.

5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A pesar de encontrar en todas las fases de la metodología el valor óptimo en un tiempo razonable y que la reducción en términos de distancia y costo respecto de la distribución actual es muy significativa, pueden existir otras configuraciones que mejoren los resultados expuestos anteriormente. Por esta razón y para cumplir con el último paso de la metodología que proponen Torres y Ramírez (2006) de determinar los factores que influyen sobre la variable respuesta observada, se propone realizar un análisis de sensibilidad sobre los parámetros que pueden influir en el espacio de cada celda y por consiguiente en el flujo entre celdas. Dichos parámetros corresponden al número mínimo de máquinas permitidas en cada celda (Emin), el número máximo de máquinas permitidas en cada celda (Emax) y la demanda estimada.

Tabla 5. Resultados de la configuraciones propuestas después del análisis de sensibilidad (Propuesta 2 y 3)

Configuración	Emi n	Emax	Demanda	Total distancia (metros/mensual)	Total costo manejo de material (USD\$/mensual)	Reducción (%)
Actual	N/A	N/A	100%	149.200	1.750	N/A
Propuesta 1	4	6	100%	59.218	693	60,31
Propuesta 2	2	6	100%	54.456	637	63,50
Propuesta 3	2	8	200%	125.596	1.468	15,82

Existen 3 propuestas de configuración de la planta que reducirían los costos asociados al manejo de materiales y la distancia que recorren los productos en la planta de producción. Sin embargo, después de realizar el análisis de sensibilidad se pudo encontrar que bajo diferentes escenarios, la propuesta 2 y 3 de configuración de la planta presentan un mejor desempeño basado en el flujo entre celdas, la distancia total recorrida y el costo del manejo de material. A continuación se realiza un análisis del costo que tendría que asumir la empresa para implementar dichas configuraciones:

Tabla 6. Costo de implementar las configuraciones propuestas

Rubro	Costo unitario (USD\$)	Propuesta 2		Propuesta 3	
		Cantidad (Unidades)	Costo Total (USD\$)	Cantidad (Unidades)	Costo Total (USD\$)
Máquina 1	4.167	1	4.167	2	8.334
Máquina 2	26.166	1	26.167	2	52.334
Máquina 3	4.267	0	0	1	4.267
Remodelación (m ²)	567	64,25	36.408	70,5	39.950
Inversión Total (USD\$)			66.741		104.885
Ahorro anual (USD\$)			13.291		3.311

6 ACKNOWLEDGEMENTS

La metodología diseñada permite la formación de celdas de manufactura teniendo en cuenta la distribución que deben seguir las máquinas dentro de la celda y al mismo tiempo la distribución que deben seguir las celdas dentro de la planta de producción. Esta metodología fue aplicada tanto en problemas estudiados previamente en la literatura (instancias teóricas) como también en una empresa real que se dedica a la elaboración y comercialización de diferentes productos naturales, obteniendo soluciones óptimas para la instancia real, para el 80% de las instancias teóricas pequeñas y el 33% de las medianas, por lo que se puede afirmar que la metodología cumple con el objetivo de implementarse en las empresas pymes.

El análisis de sensibilidad permitió encontrar que los parámetros Emax y Emin que corresponden al número máximo y el número mínimo de máquinas que se permiten por cada celda, respectivamente, pueden alterar considerablemente la distribución final obtenida, así como también el valor de la función objetivo y el valor del flujo que se presenta entre celdas.

Después de implementar la metodología propuesta y de realizar el análisis de sensibilidad se encontró que la mejor configuración de planta bajo el enfoque de celdas de manufactura reduce aproximadamente el 63% de los costos asociados al manejo de material respecto a la distribución actual que tienen la empresa (enfoque basado en procesos) lo que representa un ahorro anual cercano a los USD\$13.000. Sin embargo, para la implementación de dicha configuración se tienen que comprar nuevas máquinas y hacer una remodelación a los espacios dentro del primer piso de la planta, esto tendría una inversión alrededor de los USD\$67.000 que de acuerdo al ahorro calculado, el retorno de la inversión se haría en aproximadamente 5 años.

7 REFERENCIAS

GHOSHA, T.; SENGUPTAA, S.; CHATTOPADHYAYB, M.; DANA, P. K. Meta-heuristics in cellular manufacturing: A state-of-the-art review. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, p. 87-122, 2011.

PURCHECK, G. Combinatorial Grouping- A Lattice-Theoretic Method for the Design of Manufacturing Systems. **Journal of Cybernetics**, p. 27-60, 1974.

SRINIVASAN, G.; NARENDRAN, T. GRAFICs-a nonhierarchical clustering algorithm for group technology. **International Journal of Production Research**, p. 463-478, 1991.

FERREIRA RIBEIRO, J.; PRADIN, B. A methodology for cellular manufacturing design. **International Journal of Production Research**, p. 235-250, 1993.

RAJA, S.; ANBUMALAR, V. An effective methodology for cell formation and intra-cell machine layout design in cellular manufacturing system using parts visit data and operation sequence data. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 2014.

KHILWANI, N.; ULUTAS, B.; ATTILA ISLIER, A.; TIWARI, M.. A methodology to design virtual cellular manufacturing systems. **Journal of Intelligent Manufacturing**, p. 533-544, 2011.

OUK KIM, C.; BAEK, J.-G.; BAEK, J.-K. A two-phase heuristic algorithm for cell formation problems considering alternative part routes and machine sequences. **International Journal of Production Research**, p. 3911-3927, 2004.

MAHDAVI, I.; TEYMOURIAN, E.; BAHER, N.; KAYVANFAR, V. An integrated model for solving cell formation and cell layout problem simultaneously considering new situations. **Society of Manufacturing Engineers**, p. 655-663, 2013.

WU, X.; CHU, C.-H.M.; WANG, Y.; YAN, W. A genetic algorithm for cellular manufacturing design and layout. **European Journal of Operational Research**, 156-167, 2007.

PAPAIIOANNOU, G.; WILSON, J. A tabu search algorithm for the cell formation problem with part machine sequencing. **Foundations of Computing and Decision Sciences**, p. 97-127, 2012.

PALUBECKIS, G. Fast local search for single row facility layout. **European Journal of Operational Research**, p. 800-814, 2015.

HERAGU, S.; ALFA, A. Experimental analysis of simulated annealing based algorithms for the layout problem. **European Journal of Operational Research**, p. 190-202, 1992.

AMARAL, A. On the exact solution of a facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, p. 508-518, 2006.

HUNGERLÄNDER, P. Single-row equidistant facility layout as a special case of single-row facility layout. **International Journal of Production Research**, p. 1257–1268, 2014.

HERAGU, S.; KUSIAK, A. Efficient models for the facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, p. 1-13, 1991.

SOLIMANPUR, M.; VRAT, P.; SHANKAR, R. An ant algorithm for the single row layout problem in flexible manufacturing systems. **Computers & Operations Research**, p. 583-598, 2005.

KAKU, B.; THOMPSON, G.; BAYBARS, I. A heuristic method for the multi-story layout problem. **European Journal of Operational Research**, p. 384-397, 1988.

CHAE, J.; PETERS, B. Layout Design of Multi-Bay Facilities with Limited Bay Flexibility. **Journal of Manufacturing Systems**, p. 1-11, 2006.

HERAGU, S. S. *Facilities Design* Tercera edición. Clermont, **CRC Press, Taylos & Francis Group**, p. 220-240, 2006.

SANKARAN, S.; KASILINGAM, R. On cell size and machine requirements. **European Journal of Operational Research**, p. 373-383, 1993.

FOULDS, L.; FRENCH, A.; WILSON, J. The sustainable cell formation problem: manufacturing cell creation with machine modification costs. **Computers and Operations Research**, p. 1010-1032, 2006.

CHANDRASEKHARAN, M.; RAGAGOPALAN, R. An ideal-seed nonhierarchical clustering algorithm for cellular manufacturing. **International Journal of Production Research**, p. 451-464, 1986.

ONWUBOLU, G. C.; SONGORE, V. A tabu search approach to cellular manufacturing. **Production planning & control**, p. 153-164, 2000.

KING, J.; NAKORNCHAI, V. Machine-component group formation in group technology: review and extension,. **International Journal of Production Research**, p. 117-133, 1982.

ASKIN, R.; SELIM, H.; Vakharia, A. A methodology for designing flexible cellular manufacturing systems. **IIE Transactions**, p. 599-610, 1997.

DE WITTE, J. The use of similarity coefficients in production flow analysis. **International Journal of Production Research**, p. 503-514, 1980.

STANFEL, L. Machine clustering for economic production. **Engineering Costs and Production Economics**, p. 73-81, 1985.

ASKIN, R.; CRESSWELL, S.; GOLDBERG, J.; VAKHARIA, A. A Hamiltonian path approach to reordering the part-machine matrix for cellular manufacturing. **International Journal of Production Research**, p. 1081-1100, 1991.

CHAN, H.; MILNER, D. Direct clustering algorithm for group formation in cellular manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, p. 65-75, 1982.

VENUGOPAL, V.; NARENDRAN, T. A genetic algorithm approach to the machine-component grouping problem with multiple objectives. **Computers and Industrial Engineering**, p. 469-480, 1992.

BURBIDGE, J. Production flow analysis for planning group technology. **Oxford Science Publications**, 1989.

BOE, W.; CHENG, G. A close neighbour algorithm for designing cellular manufacturing systems. **International Journal of Production Research**, p. 2097-2116, 1991.

KUMAR, K.; KUSIAK, A.; VANNELLI, A. Grouping of parts and components in flexible manufacturing systems. **European Journal of Operational Research**, p. 387-397, 1986.

ADIL, G.; RAJAMANI, D.; STRONG, D. Assignment allocation and simulated annealing algorithms for cell formation. **IIE Transactions**, p. 53-6, 1997.

MCCORMICK, W.; SCHWEITZER, P.; WHITE, T. Problem Decomposition and data reorganisation by a clustering technique. **Operations Research**, p. 993-1009, 1972.

VANNELLI, A.; KUMAR, K. A method for finding minimal bottle-neck cells for grouping part-machine families. International. **International Journal of Production Research**, p. 387-400, 1986.

JAGANATHAN, J. Solution to large facility layout problems using group technology [2007] **Wichita State University**. Disponible en: <http://soar.wichita.edu/handle/10057/1139>, Acceso en 03 Ago. 2015.

TORRES, F.; RAMÍREZ, L. Configuración Física de una planta de productos químicos a partir de algoritmos genéticos. Bogotá, **Universidad de los Andes**, 2006.

Originais recebidos em: 23/11/2016

Aceito para publicação em: 08/12/2016