

PROPUESTA DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA BIETAPA EN AMBIENTES DE MANUFACTURA FLEXIBLE MEDIANTE EL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

ANDRÉS FELIPE SALAZAR¹
LEIDY CAROLINA VARGAS²
CAMILO ERNESTO AÑASCO³
JUAN PABLO OREJUELA⁴

RESUMEN

En ambientes de manufactura flexible, la conformación celular es adecuada para mejorar los flujos del proceso, tiempos de ciclo y calidad del producto. Su papel consiste en definir una conformación de familias de productos y células que permita el procesamiento de una o más familias dentro de una misma célula. Sin embargo, es posible que esta situación no suceda por restricciones del sistema que obligan a que el material deba desplazarse a otras células para completar su proceso, presentándose flujo intercelular, que se incrementa cuando el volumen de producción es alto; ello implica movimientos excesivos de producto en proceso y tiempos de espera que generan inadecuada ubicación o pérdidas de partes, además de contribuir al daño de productos debido al movimiento o las interferencias que se puedan presentar. El objetivo de este trabajo es proponer un enfoque de dos fases para resolver el problema de conformación celular así como su distribución en planta para una pyme

1 Ingeniero Industrial, Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística, Universidad del Valle. Cali, Colombia. felipesalazar@ingenieros.com

2 Ingeniera Industrial, Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística, Universidad del Valle. Cali, Colombia. lcargas@ingenieros.com

3 Ingeniero Industrial, Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística, Universidad del Valle. Cali, Colombia. ceag03@hotmail.com

4 Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad del Valle. Profesor Auxiliar, Escuela de Ingeniería Industrial y Estadística, Universidad del Valle. Cali, Colombia. juanp77@pino.univalle.edu.co

del sector metalmecánico, comparando mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) la perspectiva del grupo decisorio en la empresa respecto del tratamiento del flujo intercelular y de las distancias, obtenido por el uso de dos modelos de asignación para distribución en planta: el problema de asignación cuadrática (QAP) y el problema de asignación cuártica (QrAP).

PALABRAS CLAVE: distribución y diseño de planta; manufactura celular; tecnología de grupos; problema de asignación cuadrática (QAP); problema de asignación cuártica (QrAP); Proceso Analítico Jerárquico (AHP).

BIPHASE PLANT DISTRIBUTION PROPOSED IN FLEXIBLE MANUFACTURING ENVIRONMENT BY THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

ABSTRACT

In flexible manufacturing environments, the cellular distribution is adequate to improve process flows, cycle times and product quality. Its role is to define product families and cells formation that allow the processing of one or more families within the same cell. However, it is possible that this situation does not happen by restrictions of the system that requires the material must move to other cells to complete the process, presenting intercellular flow. This flow is amplified when the production volume is high, which implies excessive movements of in process products and waiting times generating an inappropriate location, or loss of parts, and contribute to the damage of products due to the movement or interference that may arise. The aim of this paper is to propose a two-phase approach to solve the problem of cell formation and the plant layout for an SME of metallurgical sector, comparing with the Analytic Hierarchy Process (AHP) the perspective of the decision-maker group about treatment on intercellular flow and distance, obtained by the use of two allocation models for plant layout: the quadratic assignment problem (QAP) and quartic assignment problem (QrAP).

KEY WORDS: Facility layout; Cellular Manufacturing System; Group Technology; quadratic assignment problem (QAP); quartic assignment problem (QrAP); Analytic Hierarchic Process (AHP).

PROPOSTA DE DISTRIBUIÇÃO EM PLANTA BIETAPA EM AMBIENTES DE MANUFATURA FLEXÍVEL MEDIANTE O PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO

RESUMO

Em ambientes de manufatura flexível, a conformação celular é adequada para melhorar os fluxos do processo, tempos de ciclo e qualidade do produto. O seu papel consiste em definir uma conformação de famílias de produtos e células que permita o processamento de uma ou mais famílias dentro de uma mesma célula. No entanto, é possível que esta situação não aconteça por restrições do sistema que obrigam a que o material deva deslocar a outras células para completar o seu processo, apresentando-se fluxo intercelular, que se incrementa quando o volume de produção é alto, o qual implica movimentos excessivos de produto em processo e tempos de espera que geram inadequada localização ou perdas de partes, além de contribuir ao dano de produtos devido ao movimento ou às interferências que se possam apresentar. O objetivo deste trabalho é propor uma focagem de duas fases para resolver o problema de conformação celular bem como a sua distribuição na planta para uma peme do setor metalomecânico, comparando mediante o Processo Analítico Hierárquico (AHP) a perspectiva do grupo decisorio na empresa respeito do tratamento do fluxo intercelular e das distâncias, obtido pelo uso de dois



modelos de atribuição para distribuição em planta: o problema de atribuição quadrática (QAP) e o problema de atribuição quártica (QrAP).

PALAVRAS-CÓDIGO: distribuição e desenho de planta; manufatura celular; tecnologia de grupos; problema de atribuição quadrática (QAP); problema de atribuição quártica(QrAP); Processo Analítico Hierárquico (AHP).

1. INTRODUCCIÓN

Determinar la distribución óptima de la planta es un problema que ha sido ampliamente estudiado y para el cual se han generado diversas metodologías a lo largo de varios años. Encontrar una solución a este problema es importante para cualquier empresa, dado el impacto que tiene en la etapa de planeación y ejecución de las operaciones y dadas las consecuencias directas que tiene sobre su efectividad y eficiencia, ya que condiciona las relaciones existentes entre los diversos factores y procesos de la planta (Wang *et al.*, 2008).

Tal como se puede apreciar en la figura 1, las actuales necesidades de los clientes en términos de variedad y volumen determinan el ambiente de fabricación de la empresa. Cuando se produce con mayor variedad, los volúmenes de producción son menores, puesto que se consumen tiempos elevados en las labores de alistamiento, se sacrifica la capacidad y

se recurre a ambientes tipo taller; por el contrario, para fabricar mayores volúmenes de producto se requiere mayor automatización, lo que disminuye la variedad de los productos, características de un ambiente de fabricación en masa.

En los ambientes más flexibles considerados como un punto intermedio entre la automatización total y la producción intermitente, se encuentran los sistemas de manufatura flexible, en los cuales es común encontrar que no todos los productos realizan los mismos recorridos, lo que genera desorden por contraflujos, tiempos de recorridos no uniformes e innecesarios que afectan el tiempo de proceso del producto. Dado que los productos deben procesarse en diferentes células, la manufatura celular aparece como una propuesta que permite clasificar en familias partes que tienen requisitos similares de procesamiento como máquinas, herramientas, rutas o formas geométricas. Posteriormente, permite la agrupación de máquinas en células que procesarán las familias conformadas.

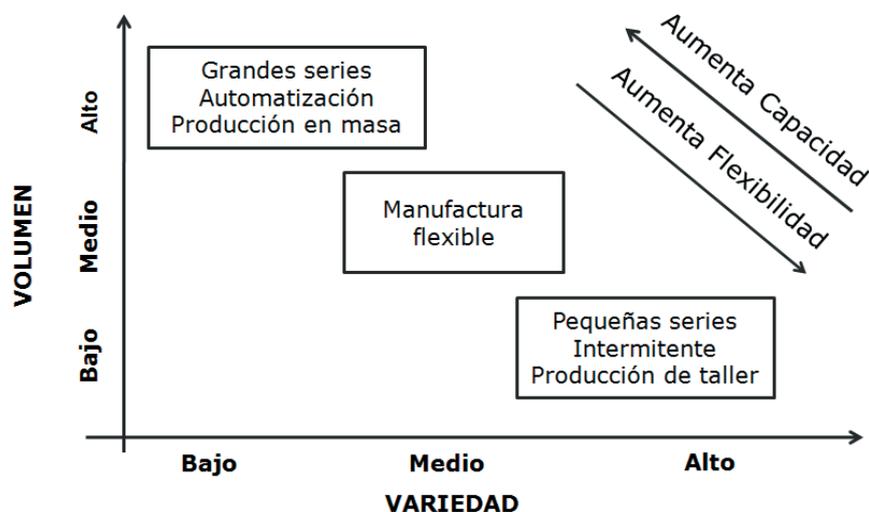


Figura 1. Características de los sistemas de producción

Para Taboun, Merchawi y Ulger (1998) la reorganización funcional de un taller en células de manufactura permite alcanzar varios beneficios, como reducciones en los costos de producción, mejoras en los tiempos de alistamiento y tiempos de ciclo, reducción en los inventarios de producto en proceso, ahorros en costos de manejo de materiales, así como mejoras en la utilización de las máquinas.

La preocupación en términos de la tecnología de grupos para la distribución en planta ha sido estudiada por autores como Chan *et al.* (2006) quienes presentan un estudio de dos etapas de agrupación de máquinas en células y distribución de ellas en una planta de producción de acero. Los autores utilizan algoritmos genéticos para dar solución eficiente a ambos problemas. En la primera etapa identifican las células y las familias por conformar apoyándose en el modelo MPGP (machine-part grouping problem). En la segunda etapa, consideran la secuencia de producción en las máquinas y usan un modelo de asignación para resolver el problema de la distribución de las células CLP (cell layout problem).

Taboun, Merchawi y Ulger (1998) presentan un estudio de dos etapas para la conformación celular, en la primera se emplea un procedimiento heurístico basado en el criterio de máxima similitud y mínimo número de máquinas en el sistema, para agrupar partes en familias y máquinas en células. La segunda etapa integra los resultados del método heurístico con un modelo matemático para optimizar varios aspectos relacionados con los costos de producción.

Ya que la distribución en planta no es exclusiva de los sistemas de manufactura celular, generalmente se ha tratado el problema de organizar una planta intentando mejorar criterios asociados a las distancias recorridas por los productos entre máquinas o estaciones de trabajo. Un modelo ampliamente aceptado para resolver este problema es el formulado por Koopmans y Beckman (1957), conocido como problema de asignación cuadrática (QAP por sus siglas en inglés). Dicho modelo consiste en determinar la asignación de n máquinas a un conjunto

de m localizaciones, mediante la minimización de un costo asociado a la distancia recorrida entre ellas y al flujo presente entre las máquinas.

Un enfoque alternativo al QAP es el planteado por Chiang, Kouvelis y Urban (2002), quienes estudiaron el impacto de las interferencias en el flujo intercelular y formularon el problema de asignación cuántica (QrAP por sus siglas en inglés), el cual, a diferencia del QAP, no considera la ubicación relativa de pares de localizaciones, por el contrario tiene en cuenta "pares de pares" de localizaciones para minimizar la interferencia en el flujo de trabajo.

Chiang, Kouvelis y Urban (2006) proponen un modelo de distribución de planta multiobjetivo y monoobjetivo basado en el modelo mencionado. Los autores hacen una revisión de literatura sobre la forma en que se ha abordado este problema y analizan el impacto que tiene en las operaciones y el flujo de trabajo, además, comparan tales resultados con el QAP tradicional y generan una frontera eficiente para ambos enfoques.

Según Jajodia *et al.* (1992), "todo diseño celular debe seguir las siguientes etapas: (i) agrupación de partes y máquinas en células, (ii) distribución de las células en las distintas áreas de la planta y (iii) distribución de las máquinas en cada célula". Si bien cada etapa representa un problema, dadas las características y complejidad que tienen, es necesario diseñar una metodología que las integre.

El presente trabajo expone las dos primeras etapas de dicha propuesta para una pyme del sector metalmecánico que maneja un ambiente de fabricación flexible. La primera etapa empieza con la conformación de productos en familias bajo el criterio de similitud de partes; posteriormente se conforman células minimizando los costos asociados al uso de los recursos, con la restricción de que éstos sean suficientes para atender la demanda proyectada para la empresa. En la segunda etapa se utilizan los modelos matemáticos QAP y QrAP para obtener propuestas a la manera de distribuir dichas células en la planta y, finalmente, se utiliza



el proceso analítico jerárquico (AHP por sus siglas en inglés) para decidir la propuesta de distribución que será implementada.

El presente artículo se desarrolla de la siguiente manera: en la sección 2, se presentan las consideraciones generales del caso de estudio, después, en la sección 3 se formulan los modelos utilizados para dar solución al problema planteado. En la sección 4 se presentan los resultados obtenidos. Al llegar a la sección 5 se discuten estos resultados con los criterios de distancia e interferencias.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desarrollo de este trabajo se basa en una empresa manufacturera ubicada en Santiago de Cali, Colombia, que se dedica desde hace más de treinta años a la producción de muebles metálicos. Para el desarrollo de la propuesta, se conformaron familias de productos a partir de las similitudes existentes en su proceso de fabricación. En la tabla 1 se presenta el resumen de las máquinas por las que se procesa cada una de las familias de productos.

Tabla 1. Máquinas usadas para el proceso de las familias de productos

Tipo de máquina	Familia 1	Familia 2	Familia 3
Cortadora	✓	✓	✓
Equipo para trazar y despuntar	✓	X	X
Troqueladora	✓	✓	X
Dobladora	✓	✓	✓
Equipo para armar y soldar	✓	✓	✓
Pulidora	✓	✓	✓
Equipo para limpiar y pintar	✓	✓	✓
Horno	✓	✓	✓
Equipo para ensamblar	✓	X	✓

La distribución actual de la planta contempla la ubicación de máquinas a lo largo de dos pisos entre los cuales se procesan las familias de productos. Para evitar que esta situación continúe, la empresa adquirió un predio adicional para lograr que el proceso de fabricación se realice en un solo piso.

Debido a la mala planificación de su proceso de expansión, se han conformado grupos de máquinas sin tener en cuenta criterios para una adecuada distribución en planta, lo cual a largo plazo ha traído serias consecuencias en el flujo de trabajo y las cargas de las máquinas (en algunos casos, con subutilización de ellas). Además se presentan largos recorridos entre cada uno de los talleres, lo que aumenta la

presencia de inventarios de producto en proceso, obstaculizando y generando caos en el normal funcionamiento del proceso productivo.

Durante el proceso de fabricación de un producto, éste se desplaza varias veces entre diversas máquinas a lo largo de los dos pisos de la planta, lo cual genera flujos erráticos y largos desplazamientos, que disminuyen la productividad de la empresa. Esto se refleja en un aumento del tiempo de ciclo por unidad y además crea la necesidad de incrementar el tamaño del lote de transferencia de materiales, lo que impide la detección oportuna de producto defectuoso.

En la empresa, los elevados inventarios de producto en proceso son una clara consecuencia de las deficiencias en la distribución de la planta y en la planificación de la producción. Estos se evidencian en la presencia de material que obstaculiza sus áreas de tránsito, limitando el uso del espacio disponible. La propuesta de distribución en planta depende del análisis de la variedad de productos y del volumen de producción que maneja la empresa. En este caso, para dar una solución efectiva, es necesario integrar herramientas que permitan planificar de manera eficiente la capacidad para responder a las necesidades cambiantes del entorno.

3. METODOLOGÍA

En esta sección se describen las características de los modelos utilizados para la propuesta de distribución en planta. Siguiendo la metodología propuesta por Jajodia *et al.* (1992), en la etapa (i) se utiliza el modelo propuesto por Askin y Standridge (1993), que se encarga de realizar la agrupación de máquinas en células de trabajo y la asignación de familias de productos (previamente definidas bajo criterios de similitud en el proceso) a tales células. En la sección 3.1 se presenta este modelo con algunas modificaciones realizadas por los autores para adaptarlo a las condiciones del caso tratado. En adelante, este modelo será referido como Modelo 1.

En la etapa (ii) se hace necesario definir el área en que serán ubicadas las células conformadas en la planta de producción. Para este propósito se usan de manera independiente dos modelos de asignación combinatoria, el QAP y el QrAP. El primero de ellos formulado por Koopmans y Beckman (1957) ha sido ampliamente estudiado, debido a su diversidad de aplicaciones y a la complejidad intrínseca del problema. Éste minimiza el costo asociado a la distancia recorrida debida al flujo intercelular. Por su parte el QrAP propuesto por Chiang, Kouvelis y Urban (2002) es una variación del QAP que centra su estudio en minimizar la posibilidad de que existan interferencias o cruces de material entre áreas.

Posteriormente, los modelos son implementados en el software de optimización LINGO utilizando como método de solución el algoritmo *branch and bound* con tiempos ejecutados de 12 minutos para el modelo QAP y 22 minutos para el modelo QrAP, con un procesador Intel Core 2 Duo y 2 GB de memoria RAM. Además el cálculo de todos los parámetros se realiza en hoja electrónica y se logran los resultados descritos en la sección 4.

Para el tercer paso de la metodología, puesto que las propuestas de asignación brindan una solución al problema con dos enfoques distintos, se decidió utilizar la herramienta multicriterio AHP para definir cuál de éstas arroja una solución más ajustada a las necesidades de la empresa. La discusión de los resultados arrojados por dicha herramienta se presenta en la sección 5.

3.1 Modelo 1

Índices

g	=	Células
i	=	Operaciones de los productos
m	=	Máquinas

Parámetros

O	=	Número total de operaciones
C_m	=	Costo de la máquina tipo m requerida
C_g	=	Costo de abrir una célula g
D_i	=	Demanda del periodo del producto asociado a la operación i
H	=	Costo por carga de manejo de material entre células g
L_i	=	Lote de transferencia de producto en proceso i
m_l, m_u	=	Límites inferior y superior de cantidad de máquinas por célula g
R_m	=	Tiempo regular disponible por periodo por tipo de máquina m
Tam_m	=	Tamaño en m^2 de la máquina m
t_{im}	=	Tiempo de proceso de la operación i en la máquina m
W	=	Costo de utilizar un m^2 del área disponible



Variables de decisión

- Y_{mg} = Número de máquinas tipo m asignadas a la célula g
 X_{ig} = 1, si la operación i se asigna a la célula g ; 0, de lo contrario
 Z_g = 1, si se usa la célula g ; 0, de lo contrario
 V_{ig} = 1, si la operación i se traslada de la célula g a otra célula para continuar su procesamiento; 0, de lo contrario

Función Objetivo

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M Y_{mg} (C_m + Wtam_m) \\ & + H * \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^I V_{ig} L_i + \sum_{g=1}^G Z_g C_g \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeto a las restricciones

$$m_l Z_g \leq \sum_{m=1}^M Y_{mg} \leq m_u Z_g \quad \forall g \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I D_i t_{im} X_{ig} \leq R_m Y_{mg} \quad \forall m, g \quad (3)$$

$$X_{ig} - X_{i+1,g} \leq v_{ig} \quad \forall g, i \text{ no terminal de un producto} \quad (4)$$

$$\sum_{g=1}^G X_{ig} = 1 \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I X_{ig} \leq OZ_g \quad \forall g \quad (6)$$

$$Y_{mg} = \text{Entero} \quad (7)$$

$$X_{ig} \in \{0|1\} \quad \forall i, \forall g \quad (8)$$

$$Z_g \in \{0|1\} \quad \forall i, \forall g \quad (9)$$

$$v_{ig} \in \{0|1\} \quad \forall i, \forall g \quad (10)$$

El propósito de la función objetivo es minimizar los costos en los que incurren los planes de

capacidad y producción, también reducir los costos asociados a la agrupación y distribución de las máquinas realizada. Para un mayor nivel de detalle se explica la intención de cada componente de la función objetivo.

Costo de adquisición de máquinas

$$\sum_{g=1}^G \sum_{m=1}^M Y_{mg} (C_m + Wtam_m) \quad (1.A)$$

Cada máquina tipo m tiene un costo de adquisición C_m en el que se incurre cada vez que se necesite obtener una adicional; a este parámetro se le suman los costos de utilizar el espacio necesario para hacer uso de dicha máquina. Esto quiere decir que la cantidad de máquinas tipo m por comprar tiene un costo asociado, el cual también se incluye en la función objetivo para restringir el uso excesivo de máquinas en la planta.

Costo por movimiento de operaciones entre células

$$H \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^I v_{ig} L_i \quad (1.B)$$

Cada vez que un producto tenga que salir de una célula a otra para terminar su fabricación, se causa un costo de transporte H . Al incluir dicho costo en la función objetivo se exige una solución que disminuya la cantidad de traslados de producto en proceso entre células. La componente L_i se incluye, puesto que si es necesario un traslado, se moviliza una cantidad de producto en proceso equivalente al lote de transferencia.

Costo de apertura de células

$$\sum_{g=1}^G Z_g C_g \quad (1.C)$$

Al incluir este componente en la función objetivo se intenta penalizar la apertura excesiva de células, puesto que el crear una célula adicional

implica unos costos C_g relacionados con sus adecuaciones locativas.

A continuación se presenta el modelo QAP que determina la asignación de las células a las áreas disponibles con el criterio de minimización de los costos asociados a la distancia recorrida.

3.2 Problema de asignación cuadrática (QAP)

Conjuntos

G Células

A Áreas

Índices

i, h Células

j, k Áreas

Parámetros

$A_{i,h}$ = Área que ocupan las células i, h

$AD_{j,k}$ = Áreas j, k disponibles en la empresa

F_{ih} = Flujo entre las células i, h

$d_{j,k}$ = Distancia entre las áreas j, k

$C_{j,k}$ = Costo de mover una unidad de distancia entre las células i, h

Variables de decisión

X_{ga} = 1, si la célula g se asigna al área a ; 0 de lo contrario

Función Objetivo

$$\text{Min} \sum_{i=1}^I \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K F_{ih} d_{j,k} C_{j,k} X_{ij} X_{hk} \quad (11)$$

Sujeto a las restricciones

$$\sum_{a=1}^A X_{ga} = 1 \quad \forall g \in G \quad (12)$$

$$\sum_{g=1}^G X_{ga} = 1 \quad \forall a \in A \quad (13)$$

$$\sum_{g=1}^G A_g X_{ga} \leq AD_a \quad \forall a \in A \quad (14)$$

$$X_{ga} \in \{0|1\} \quad \forall g \in G, \forall a \in A \quad (15)$$

$$i, h \in G \quad (15.a)$$

$$j, k \in A \quad (15.b)$$

El propósito de la función objetivo es minimizar los costos de asignar m células de trabajo a n áreas disponibles. Dichos costos están relacionados con las decisiones de asignación y dependen de las distancias entre las áreas y el flujo entre las células, además de un costo adicional generado por transportar carga entre áreas. El modelo QAP considera la asignación de pares de células para la disminución de costos. Ahora se considera la asignación de pares de células con el objetivo de minimizar la interferencia en el flujo del inventario en proceso entre cada par de células, para tal fin se considera el modelo QrAP presentado a continuación.

3.3 Problema de asignación cuártica (QrAP)

Conjuntos

G Células

A Áreas

Índices

i, k, p, r Células

j, l, q, s Áreas disponibles

Parámetros

$C_{ijklpqrs}$ Costo de interferencia por localizar las células i, k, p, r en las áreas disponibles j, l, q, s

Variables de decisión

X_{ga} = 1, si la célula g se asigna al área a ; 0 de lo contrario



Función objetivo

$$\text{Min} \sum_i^I \sum_j^J \sum_k^K \sum_l^L \sum_p^P \sum_q^Q \sum_r^R \sum_s^S C_{ijklpqrs} X_{ij} X_{kl} X_{pq} X_{rs} \quad (16)$$

Sujeto a las restricciones

$$\sum_a^A X_{ga} = 1, \quad \forall g \in G \quad (17)$$

$$\sum_g^G X_{ga} = 1, \quad \forall a \in A \quad (18)$$

$$\sum_{g=1}^G A_g X_{ga} \leq AD_a \quad \forall a \in A \quad (19)$$

$$X_{ga} \in \{0|1\} \quad \forall g \in G, \quad \forall a \in A \quad (20)$$

$$i, k, p, r \in G \quad (20.a)$$

$$j, l, q, s \in A \quad (20.b)$$

El propósito de la función objetivo de este modelo es minimizar los costos de asignar n células de trabajo a m áreas disponibles en la empresa. Esto lo hace disminuyendo la cantidad de interferencias generadas por el recorrido que deben hacer los productos a lo largo de las áreas para continuar con su proceso de fabricación.

Para los autores es importante que ambos modelos realicen las asignaciones teniendo en cuenta el área disponible para cada célula. Por esta razón, se proponen las restricciones 14 y 19, las cuales obligan al modelo a verificar que cada célula que se asigne ocupe un espacio menor o igual al que se encuentra disponible.

4. RESULTADOS

En la tabla 2 y la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos al aplicar el modelo 1. En la tabla 2 se puede apreciar como este modelo indica la cantidad de máquinas que se utilizan y su respectiva asignación en cada célula. Este resultado está representado por la variable entera Y_{mg} .

Tabla 2. Asignación de cantidad y tipos de máquinas a células conformadas

Tipo de Máquina	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4
Cortadora	0	1	0	1
Equipo para trazar y despuntar	0	1	0	0
Troqueladora	0	0	0	1
Dobladora	0	0	1	1
Equipo para armar y soldar	0	0	1	0
Pulidora	0	0	1	0
Equipo para limpiar y pintar	1	0	0	0
Horno	1	0	0	0
Equipo para ensamblar	1	0	0	0

De la tabla 3 se deduce cuáles operaciones son asignadas a cada célula de trabajo por cada una de las familias de productos de la empresa. En el modelo planteado este resultado se representa con la variable binaria X_{ig} .

En las tablas 4 y 5 se pueden apreciar los resultados obtenidos al utilizar los modelos QAP y QrAP respectivamente, los cuales sugieren la asignación de cada célula conformada a las áreas disponibles de la empresa.

Tabla 3. Asignación de operaciones a células

Familia	Operación	Célula 1	Célula 2	Célula 3	Célula 4
1.	Cortar	0	1	0	0
	Trazar y despuntar	0	1	0	0
	Troquelar	0	0	0	1
	Doblar	0	0	1	0
	Armar y soldar	0	0	1	0
	Pulir	0	0	1	0
	Limpiar y pintar	1	0	0	0
	Hornear	1	0	0	0
	Ensamblar	1	0	0	0
2.	Cortar	0	0	0	1
	Troquelar	0	0	0	1
	Doblar	0	0	0	1
	Armar y soldar	0	0	1	0
	Pulir	0	0	1	0
	Limpiar y pintar	1	0	0	0
	Hornear	1	0	0	0
3.	Cortar	0	0	0	1
	Doblar	0	0	0	1
	Armar y soldar	0	0	1	0
	Pulir	0	0	1	0
	Limpiar y pintar	1	0	0	0
	Hornear	1	0	0	0
	Ensamblar	1	0	0	0

Tabla 4. Resultados de asignación del modelo QAP

	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
Célula 1	1	0	0	0
Célula 2	0	1	0	0
Célula 3	0	0	1	0
Célula 4	0	0	0	1

Tabla 5. Resultados de asignación del modelo QrAP

	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
Célula 1	1	0	0	0
Célula 2	0	0	0	1
Célula 3	0	1	0	0
Célula 4	0	0	1	0



En las figuras 2 y 3 se puede apreciar el efecto que tiene la propuesta de distribución en planta como producto de utilizar los modelos QAP y QrAP sobre las distancias y flujos intercelulares. Las convenciones usadas para identificar el recorrido de cada familia de productos es la siguiente:

Convenciones

Familia 1 - - - - ->

Familia 2 - · - · - ->

Familia 3 ———>

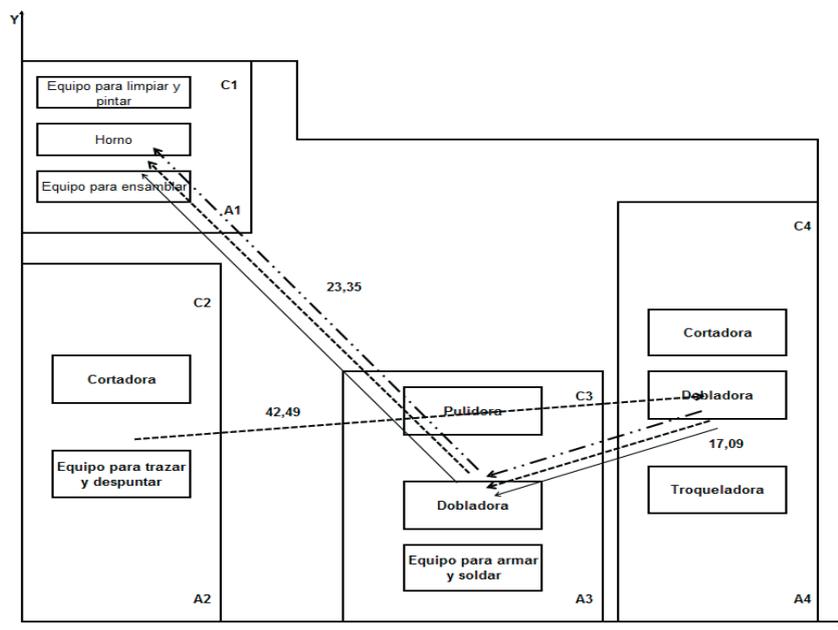


Figura 2. Propuesta de distribución en planta obtenida al utilizar el modelo QAP

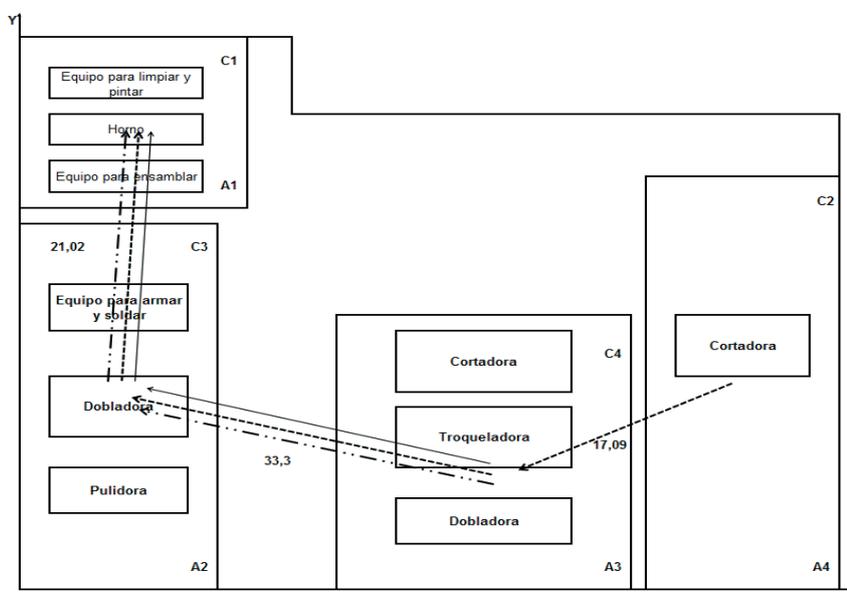


Figura 3. Propuesta de distribución en planta obtenida al utilizar el modelo QrAP

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el desarrollo de esta sección se ha decidido analizar el impacto que genera la utilización de

cada propuesta en los indicadores de subutilización de las máquinas, flujo intercelular, disminución de las distancias y de las interferencias.

Tabla 6. Comparación de las mejoras de los modelos en las etapas estudiadas

Criterio	Situación actual	Etapa I Modelo 1	Etapa II	
			QAP	QrAP
Subutilización de las máquinas	3 cortadoras 4 dobladoras	2 cortadoras 2 dobladoras	N.A.	N.A.
Distancia recorrida	237 m	N.A.	163,8 m	180,1 m
Interferencias	18	N.A.	2	0

5.1 Subutilización de las máquinas

Al analizar la tabla 6 se puede apreciar como el modelo 1, para cumplir con la demanda proyectada, sugiere la utilización de una máquina de cada tipo, excepto por las máquinas cortadoras y dobladoras, para las que se propone usar dos máquinas. Al comparar las cantidades propuestas por el Modelo 1 con las cantidades actuales, se encuentra una subutilización hasta del 50 % para éstas, lo cual se debe a que las cantidades reales de la empresa son 3 y 4 respectivamente.

5.2 Flujo intercelular

Uno de los objetivos de la manufactura celular es agrupar gran número de piezas comunes y producirlas en una célula, de forma que no exista flujo intercelular. Sin embargo, en las figuras 2 y 3 se puede verificar que esto no sucede. Ello se debe a las restricciones de área y al tamaño de las máquinas de la empresa, lo cual no hace posible agrupar las máquinas que intervienen en el proceso de una familia en una única célula.

5.3 Disminución de las distancias

En la actualidad, la planta se encuentra distribuida por talleres con largas distancias entre sí, lo que

implica realizar recorridos equivalentes a 237 m para elaborar un producto de las tres familias. Al calcular esta distancia mediante el modelo QrAP se encuentra que este valor es de 180,1 m, mucho menor que el actual. Sin embargo, si se comparan estos resultados con el obtenido por el modelo QAP se encuentra que éste arrojó el óptimo con una distancia total de 163,81 m para el recorrido de las tres familias.

5.4 Disminución de las interferencias

A pesar de que el modelo QAP arroja el óptimo en cuanto al criterio distancia, no lo hace para el criterio interferencias. Como se puede apreciar en la figura 2, se presentan dos de ellas entre la familia 1 y las familias 2 y 3, lo cual genera congestión e intersecciones indeseables en el flujo del trabajo. Por su parte, el modelo QrAP obtuvo una asignación libre de congestiones, puesto que su propuesta de distribución no presenta interferencias. Cabe resaltar que las interferencias presentadas en la solución del modelo QAP son entre familias de productos; si se considera que cada familia está compuesta al menos por tres productos, la cantidad de interferencias aumentaría. El modelo QrAP evita que se presente alguna interferencia; es interesante la situación presentada por este modelo, ya que el tipo de producto que maneja la empresa es de gran volumen y sensible a reprocesos por su traslado.



La importancia de eliminar las interferencias en el flujo del proceso ha sido expresada por Luggen (1991): “Los patrones de flujo complejos crean movimientos excesivos de partes y tiempos de espera, que resultan en pérdidas o inadecuadas ubicaciones de las partes, y contribuyen a su daño debido al excesivo movimiento”.

Es posible eliminar las interferencias arrojadas por la solución del modelo QAP por medio de una eficiente programación de la producción. Tal como lo indican Chiang, Kouvelis y Urban (2006):

“El hecho que exista flujo entre pares de células no garantiza que la interferencia ocurra; es posible que el flujo ocurra en diferentes periodos. A menos que se especifique en la programación de la producción de corto plazo, una gran cantidad de flujo de trabajo resultará en una alta probabilidad de experimentar interferencias”.

El desarrollo de esta temática es interesante para los autores, sin embargo, se encuentra fuera del alcance de este trabajo.

6. IMPLEMENTACIÓN DE LA HERRAMIENTA DE DECISIÓN AHP

Tras observar los resultados obtenidos con cada modelo matemático y analizar su incidencia en el flujo de producción de la empresa, se hace importante decidir cuál de las dos propuestas de distribución en planta será aplicada. Para cumplir con este objetivo se utilizó la herramienta de decisión multicriterio AHP y se evaluaron tres alternativas, la primera de ellas fue no implementar ninguna de las dos propuestas de distribución, es decir, tomar como alternativa la situación actual de la empresa. La segunda opción fue implementar la propuesta del modelo QAP y como tercera, la del modelo QrAP. Las anteriores alternativas se evaluaron teniendo en cuenta tres criterios:

- *Costos de implementación.* Considerados como los costos en los que debería incurrir la empresa para implementar las distintas propuestas de

distribución en planta, teniendo en cuenta que para la situación actual se plantea que la empresa mantendría costos en incapacidades por accidentes laborales ocurridos en el recorrido entre los dos pisos de la planta.

- *Interferencias en el flujo del proceso.* Medido como las interferencias presentadas para las tres familias de productos.
- *Distancia total recorrida por las familias de productos.* Debido a que el objetivo es mejorar los flujos del proceso por medio de la disminución en los recorridos, se considera este criterio para evaluar las alternativas. Mediante la proyección en el plano de la empresa se calculan las distancias que son necesarias recorrer para terminar una unidad de producto en los modelos de asignación QAP y QrAP.

Para el desarrollo del AHP se explicó el método a los directivos de la empresa y se consultó acerca de sus preferencias para cada uno de los criterios utilizando evaluación por pares con la escala de Saaty (1977). El esquema jerárquico de la decisión se muestra en la figura 4.

Tras realizar la comparación por pares de los diversos criterios, se obtuvo que para el grupo decisorio el factor distancia tiene mayor relevancia (62 %), seguido por las interferencias con 24 %, y el costo con 14 %. Esto se debe a que al ser la situación actual representativa de largos recorridos y distancias, es deseable su minimización para tratar de evitar interferencias en el flujo del proceso.

Posterior al análisis de prioridad entre los criterios, se realizó el análisis entre las alternativas consideradas, obteniendo como resultado la selección de la propuesta de distribución en planta sugerida por el modelo QAP, que tuvo el 50 % (QrAP registró el 42 % y la situación actual, el 8 %). Este resultado es consecuente con el obtenido antes, puesto que la finalidad de dicho modelo es la minimización de las distancias, objetivo principal del grupo decisorio.

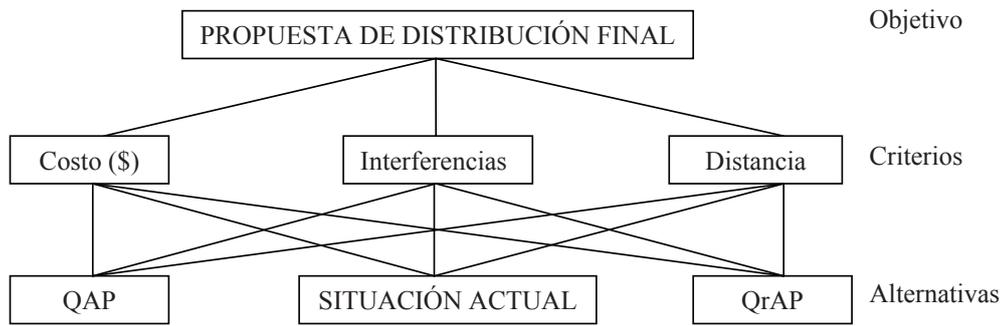


Figura 4. Estructura de decisión multicriterio utilizada

7. CONCLUSIONES

La configuración actual en talleres del sistema de producción de la empresa exhibe grandes ineficiencias debido a los largos recorridos, los altos niveles de inventario de producto en proceso, la subutilización de las máquinas y los flujos erráticos presentes en el proceso de fabricación de cada familia. Por estas razones, se considera adecuado el uso de la configuración celular, ya que busca situar en una misma área las máquinas asociadas a la obtención de una familia de productos, disminuyendo así estos indicadores.

El presente documento desarrolla una propuesta que parte del análisis del sistema de producción de una pyme del sector metalmeccánico, para proponer una distribución de la planta basada en tecnología de grupos y en los modelos de asignación QAP y QrAP soportando la decisión final mediante la herramienta multicriterio AHP, priorizando las diferentes alternativas de diseño de planta.

Los modelos matemáticos QAP y QrAP buscan un ordenamiento de los recursos de producción, de tal forma que se mejore el desempeño de los criterios distancia total recorrida por los productos y minimización de las interferencias. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la decisión de cómo distribuir físicamente una planta afecta y a su vez está determinada por factores que no son tenidos en cuenta por estos modelos y que son importantes para cualquier empresa, dado el impacto que tienen

en la etapa de planeación y ejecución de las operaciones y las consecuencias directas que tienen sobre la efectividad y eficiencia de la empresa.

Se considera un complemento importante para este tipo de decisiones la utilización de la tecnología de grupos, puesto que permite analizar la demanda de productos y con base en ella calcula la capacidad necesaria (medida en cantidad de máquinas de cada tipo) para su completa satisfacción. Este análisis permite identificar la presencia de máquinas subutilizadas o muestra la necesidad de adquirir recursos adicionales, además de presentar otros beneficios, como mayor control sobre el proceso, disminución de recorridos, mejoramiento del flujo de productos y disminución de tiempos ociosos.

Los resultados demuestran que cualquiera de las dos configuraciones arrojadas por los modelos QAP y QrAP presentan una mejoría notable respecto a la situación actual de la empresa objeto de estudio, puesto que las propuestas aumentan los niveles de productividad al mejorar la utilización de los recursos mano de obra, materiales y máquinas.

Debido a que la decisión de distribución en planta en una empresa manufacturera se caracteriza por abarcar el análisis de diversos criterios, entre ellos las opiniones particulares del grupo decisorio, la herramienta AHP se considera adecuada para tomar una decisión final que responda a la rigurosidad técnica de la decisión, pero que contemple aquellos factores subjetivos relevantes para el grupo directivo.



La decisión final de implementar la propuesta de distribución arrojada por el modelo QAP tiene grandes beneficios si se compara con la situación actual. Se mejora la utilización de las máquinas en un 50 %, no es la estrategia óptima para el flujo intercelular bajo el criterio de interferencias, sin embargo, para el grupo decisorio es importante que la distancia recorrida por las tres familias pase de 237 m recorridos actualmente a 163,7 m con la propuesta del modelo QAP. Así mismo, se espera una disminución para los tiempos de ciclo por producto y se plantea una mejor utilización de la mano de obra considerando que bajo la propuesta de estudio no es necesario despedir trabajadores ni subcontratar para periodos previstos de altas demandas.

El enfoque bietapa propuesto para el ambiente de manufactura flexible apoyado en la herramienta de decisión multicriterio brinda una decisión robusta de relevancia para la empresa y mayor aún si se tiene en cuenta que la distribución en planta es una tarea de largo plazo que incide en gran medida en el desempeño futuro de la organización.

REFERENCIAS

- Askin, Ronald and Standridge, Charles. *Modeling and analysis of manufacturing systems*. Chapter 6 "Group Technology", section 6.6 "An economic, mathematical program for group formation", p. 195. Michigan: John Wiley & Sons. 1993. 461 p.
- Chan, Felix Tung S.; Lau, K. Wang; Chan, Philip L. Y. and Choy, Kim L. (2006). "Two-stage approach for machine-part grouping and cell layout problems". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 22, No. 3 (July), pp. 217-238.
- Chiang, Wen-Chyuan; Kouvelis, Panagiotis and Urban, Timothy (2002). "Incorporating workflow interference in facility layout design: the quartic assignment problem". *Management Science*, vol. 48, No. 4 (April), pp. 584-590.
- Chiang, Wen-Chyuan; Kouvelis, Panagiotis and Urban, Timothy (2006). "Single and multi-objective facility layout with workflow interference considerations". *European Journal of Operational Research*, vol. 174, No. 3 (November), pp. 1414-1426.
- Jajodia, Satish; Minis, Ioannis; Harhalakis, George and Proth, Jean-Marie (1992). "CLASS: Computerized layout solutions using simulated annealing". *International Journal of Production Research*, vol. 30, No. 1 (January), pp. 95-108.
- Koopmans, Tjalling and Beckmann, Martin (1957). "Assignment problems and the location of economic activities". *Econometrica*, vol. 25, No. 1 (January), pp. 53-76.
- Luggen, William. *Flexible manufacturing cells and systems*, New Jersey: Prentice Hall, 1991. 491 p.
- Saaty, Thomas L. (1977). "A scaling method for priorities in hierarchical structures". *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 15, No. 3 (June), pp. 234-281.
- Taboun, Salem; Merchawi, Newman and Ulger, Timothy (1998). "A two-stage model for cost effective part family and machine cell formation". *Computers and Industrial Engineering*, vol. 34, No. 4 (September), pp. 759-776.
- Wang, Guoxin; Yan, Yan; Zhang, Xiang; Ning, Ruxin and Wu, Zhijun (2008). "Integrating simulation optimization with VR for facility layout evaluation", *International Conference on Information Management and Industrial Engineering*. Taipei (19-21 December).