

El *WIP* como objetivo estratégico en la distribución de planta

WIP as an strategic objective for facility layout

COLCIENCIAS TIPO 1. ARTÍCULO ORIGINAL

RECIBIDO: OCTUBRE 22, 2012; ACEPTADO: NOVIEMBRE 23, 2012

Daniel Cardona
dco_mv@hotmail.com

Luis Felipe Cardona
lfcardona@icesi.edu.co

Juan Diego Forero
jd.forero39@hotmail.com

Leonardo Rivera
leonardo@icesi.edu.co

Universidad Icesi, Cali - Colombia

Resumen

Este artículo presenta una manera de obtener una distribución de planta que minimiza los niveles de inventario de trabajo en proceso (WIP) para un sistema de producción donde el flujo de materiales se lleva a cabo por medio de diferentes sistemas de manejo de materiales. El WIP como valor objetivo del problema de distribución de planta plantea una diferencia con la mayoría de modelos de optimización existentes y brinda información sobre una medida de rendimiento operativo que por lo general no es considerada, pero que impacta de manera directa los costos asociados a la producción. Se demostró que el modelo presentado permite encontrar diseños de planta con mejor desempeño en este indicador que los encontrados por medio de un modelo que considere un solo sistema de manejo de materiales.

Palabras Clave

Distribución de planta; WIP; optimización; modelo de colas.

Abstract

This paper presents a model to generate the layout of a facility, minimizing the work in process (WIP) for a production system that uses multiple material handling systems. Using WIP as an objective in a facility layout problem is a novel approach. WIP is an operating performance measure that impacts directly in the production costs, and is generally not considered in facility layout problems. As a result, we present a model to design facility layouts with a better WIP performance than the ones designed by a model with a single material handling system

Keywords

Facility layout; WIP; optimization; queuing models.

I. INTRODUCCIÓN

El problema de distribución de planta [FLP] consiste en encontrar la mejor distribución para una planta, bajo unos criterios específicos. Este problema ha sido ampliamente estudiado por tener un impacto significativo en los costos de manufactura, en el inventario de trabajo en proceso, en el tiempo de ciclo y en la productividad de la planta.

Los criterios para elegir la distribución pueden ser tanto cuantitativos como cualitativos. El más usado en la literatura ha sido el costo de manejo de materiales, pero existen diferentes propuestas. Fu y Kaku (1997) muestran los efectos que tiene un diseño de planta sobre el desempeño operativo de un sistema de manufactura.

En la literatura existen diferentes objetivos al momento de diseñar una distribución de planta, estos criterios pueden ser tanto cuantitativos como cualitativos. Entre los primeros se encuentran: minimizar el costo del espacio; minimizar el costo de manejo de materiales; minimizar el costo de reorganizar (Hicks & Lowan, 1976), minimizar el *backtracking* y el *bypassing* (Braglia, 1996), minimizar la congestión del flujo de material (Afentakis, 1989), minimizar las irregularidades de forma (Meller, Narayanan, & Vance, 1998) y maximizar las adyacencias. También existen artículos que consideran más de un objetivo simultáneamente (Dweri & Meier, 1996), que proponen un modelo que minimice, a la vez, el flujo de materiales y de información. En los objetivos cualitativos se encuentran la seguridad de la planta, la flexibilidad de la distribución, el ruido y la estética (Singh & Sharma, 2006).

El objetivo más usado para encontrar la distribución óptima es minimizar el costo de manejo de materiales (McKendall, Shang, & Kuppusamy, 2006; Meller & Kai-Yin, 1996). En los últimos años se ha incluido un criterio diferente que considera otras medidas de rendimiento operativo, como el inventario de trabajo en proceso (*WIP*) o el tiempo de ciclo (*LT*). Fu y Kaku (1997), Benjaafar (1998), Meng, Heragu y Zijm (2004) y Raman, Nagalingam y Gurd (2009) incluyen el *WIP*. Los dos primeros intentan minimizarlo, mientras los demás tienen una función multi-objetivo que pretende minimizar el *WIP*, el *MHC* y otros criterios simultáneamente.

La inclusión del *WIP* como criterio de decisión permite considerar los efectos de las variaciones estocásticas en los sistemas productivos. Benjaafar (1998) demuestra que al minimizar el *WIP* no necesariamente se minimiza el *MHC*,

presentando situaciones en la que estos dos objetivos se encuentran en conflicto, enfatizando que debe ser considerado de manera independiente y resaltando su impacto sobre los costos de operación totales de la empresa.

El modelo propuesto por Benjaafar (1998) tiene como objetivo introducir el *WIP* como un criterio estratégico en el FLP, por lo que se maneja un modelo muy general. La propuesta en este artículo consiste en extender este modelo a situaciones más comunes que permitan reflejar la incertidumbre de los sistemas productivos. El supuesto más rígido que se quiere relajar es considerar un solo tipo de manejo de materiales al interior de la planta.

En este artículo se desarrolla una metodología para diseñar una distribución de planta que incluye la posibilidad de manejar múltiples entidades de manejo de materiales, con el propósito de modelar sistemas productivos que cuenten con diferentes tipos de equipo de manejo de materiales con variaciones significativas en sus características y así obtener una mejor aproximación de su comportamiento. Esto, permite además, realizar un análisis diferenciado de las medidas de rendimiento operacional de cada una de las entidades de manejo de materiales, resultando en información útil para identificar oportunidades de mejora.

La metodología desarrollada se comparó con el modelo propuesto por Benjaafar (1998) y se encontró una diferencia significativa en el desempeño de los métodos para el cálculo del *WIP* de una distribución de planta. Presenta, de manera cuantitativa, las ventajas de utilizar el modelo desarrollado.

La sección 2 presenta una revisión de la literatura sobre los problemas de distribución de planta y los diferentes criterios de decisión utilizados. La sección 3 plantea el problema que en este artículo se trabaja y las condiciones de operación del sistema, y presenta la formulación del modelo de colas para el cálculo del *WIP* de una distribución de planta. La sección 4 analiza los resultados de usar el modelo propuesto y lo compara con el desarrollado por Benjaafar (1998). Por último, la sección 5 expone las conclusiones y los trabajos de investigación que podrían continuar a partir de este trabajo.

II. ANTECEDENTES

Una distribución de planta es la organización de todo lo necesario para la producción de bienes o la prestación de

un servicio (Heragu, 2006). El problema de distribución de planta es conocido por tener un alto impacto en los costos de operación de la planta (Raman, Nagalingam, & Gurd, 2009).

En la literatura del FLP se encontró que solo el 5% de los artículos incluye medidas de rendimiento operativo (ver Tabla 1), enfocándose en los costos de manejo de materiales y subestimando el impacto de otros factores. Esto evidencia la falta de modelos analíticos capaces de capturar de manera explícita los efectos en la distribución de planta en comportamientos de planta dinámicos (Li & Smith, 1994).

Tabla 1. Artículos de FLP clasificados según el criterio usado¹

Criterio	Frecuencia	Porcentaje
Rendimiento operativo	3	5%
Rendimiento no-operativo	59	95%

Las medidas de rendimiento más comunes son la tasa de producción (cantidad de unidades producidas en un periodo de tiempo), el tiempo promedio de ciclo (tiempo promedio que una unidad se mantiene en el sistema), el nivel de servicio (porcentaje del tiempo en que el consumidor está totalmente satisfecho) y el inventario promedio.

En la práctica el WIP de cada estación de trabajo se utiliza para reducir los efectos de la incertidumbre de fabricación y asegurar las tasas de producción y los tiempos de ciclo objetivos (Guo, Chiang, & Pai, 2007). Un nivel de WIP demasiado alto alarga los tiempos de ciclo y puede disminuir el rendimiento de entregas a tiempo, lo

que además resulta en mayor ocupación de espacio y mayores requerimientos de recursos para el manejo de materiales (Askin & Krisht, 1994). Pero la principal consecuencia del WIP es la reducción en los tiempos de ciclo de manufactura, lo que es estratégicamente importante para el éxito de una empresa. Cuando las empresas pueden despachar sus pedidos más rápido que la competencia, tienen una ventaja competitiva en el mercado (Sepheri & Nahavand, 2007). Entonces, para incrementar la eficiencia de producción de los sistemas de manufactura, se deben reducir el inventario de trabajo en proceso y el tiempo de ciclo, mientras se cumplan las metas de producción (Bai & Gershwin, 1994).

Fu y Kaku (1997) fueron los primeros en incluir, como criterio para el diseño de una distribución de planta, medidas de rendimiento operativo, como el WIP; lo hicieron utilizando un *modelo de colas* abierto que asume que los procesos de llegadas siguen una *distribución de Poisson* y los tiempos de procesamiento, una *distribución exponencial*. El sistema se modela como una red de colas M/M/1 y M/M/n independientes. Su conclusión principal es que minimizar el WIP equivale a minimizar el MHC.

Benjaafar (1998) presenta una reformulación del problema de asignación cuadrático, donde el objetivo es minimizar el WIP. Allí muestra que el cambio en una distribución tiene un impacto significativo en el WIP, los tiempos de ciclo, el cumplimiento de tasas de producción y los requerimientos de capacidad de manejo de materiales. Sus resultados indican que la conclusión presentada por Fu y Kaku (1997) no se cumple de manera general, demostrando que al minimizar el WIP no necesariamente se minimiza el MHC.

Meng, Heragu, & Zijm (2004) exponen el problema distribución de planta reconfigurable. Se distinguen de los problemas de distribución dinámicos porque consideran los efectos de las medidas de rendimiento operativas, como el WIP y el tiempo de ciclo, como criterios de decisión. A diferencia del modelo propuesto por Benjaafar (1998) el sistema de manejo de materiales no se incluye como un departamento adicional, sino que consideran cada departamento como un sistema independiente.

III. FORMULACIÓN DEL MODELO DE COLAS

A. Planteamiento del Problema

En este artículo se presenta un modelo para encontrar la distribución óptima de una planta minimizando el WIP.

¹ (Abedzadeh, Mazinani, Moradinasab, & Roghanian, 2012; Aderoba, 1997; Balakrishnan, 1998; Balakrishnan & Cheng, 2009; Balakrishnan & Cheng, 2005; Balakrishnan, Cheng, & Conway, 2000; Baykasoglu & Gindy, 2001; Benjaafar, 1998; Braglia, Zanoni, & Zavanella, 2005; Chen M., 1998; Chen & Rogers, 2009; Chen G. Y., 2007; Chen & Rogers, 2009; Chen, Chen, & Chuang, 2011; Corry & Kozan, 2004; da Silva, Bahiense, Ochi, & Boaventura-Netto, 2012; Dong, Wu, & Hou, 2009; Dunker, Radons, & Westkamper, 2005; El-Rayes & Said, 2009; Erel, Ghosh, & Simon, 2003; Fu & Kaku, 1997; Jaramillo & McKendall Jr., 2010; Jaramillo & McKendall Jr., 2004; Jithavech & Krishnan, 2010; Jolai, Taghipour, & Javadi, 2011; Kia, 2011; Krishnan, Jithavech, & Liao, 2009; Krishnan, Cheragi, & Nayak, 2008; Kulturel-Konak, 2007; Kulturel-Konak, Smith, & Norman, 2007; Lacksonen, 1997; Lacksonen & Ensore, 1993; Ma & Zhang, 2010; Mazinani, Abedzadeh, & Mohebbali, 2012; McKendall Jr. & Hakobyan, 2010; McKendall Jr. & Shang, 2006; McKendall Jr., Shang, & Kuppusamy, 2006; Meng, Heragu, & Zijm, 2004; Moslemipour & Lee, 2011; Pillai, Hunagund, & Krishnan, 2011; Raman, Nagalingam, & Gurd, 2009; Rawabdeh & Tahboub, 2006; Rezaeideh, Ghazanfari, Saidi-Mehrabad, & Jafar, 2009; Ripon, Glette, Hovin, & Torresen, 2010a; Ripon, Glette, Hovin, & Torresen, 2011; Ripon, Glette, Hovin, & Torresen, 2010b; Ripon, Glette, Koch, Hovin, & Torresen, 2011; Rosenblatt, 1986; Sahin & Turkbey, 2009; Sahin, Ertogral, & Turkbey, 2012; Saidi-Mehrabad & Safaei, 2007; Shahbazi, 2010; Singh S. P., 2010; Tian, Li, & Zhao, 2010; Urban, 1998; Wang L., 2011; Wang C.-T., 1999; Yang & Chuang, 2011; Zouein & Tommelein, 1999).

La planta a modelar sigue un sistema *Pull* que tiene un flujo de producción tipo *flowline*, en el cual cada producto tiene una ruta específica; es decir, todas las veces debe seguir ese orden, estrictamente. Cada producto tiene un valor esperado de la demanda (D_i) y un coeficiente de variación cuadrático (C_i^2); las tasas de llegada y los tiempos de servicio de los departamentos siguen distribuciones arbitrarias..

Esta planta cuenta con un sistema de manejo de materiales compuesto por diferentes equipos que no necesariamente presentan características similares. Las características relevantes para el modelo son la velocidad, el costo de funcionamiento por unidad de distancia y la unidad de carga que manejan, pues ellas tienen un impacto en las medidas de rendimiento operativo del sistema.

Además, el flujo de materiales del departamento i al departamento j se hace de manera estricta, mediante un tipo de equipo de manejo de materiales.

B. Supuestos

Benjaafar (1998) propone un modelo de colas abierto donde los tiempos de procesamientos y las tasas de llegada siguen distribuciones generales; además incluye un único sistema de manejo de materiales que atiende a toda la planta que es modelado como un departamento adicional. Al considerar que las distribuciones de los tiempos de procesamiento y de las tasas de llegadas son generales, permite capturar los efectos de la variabilidad de estos dos procesos. Una limitación del modelo es que al considerar un solo sistema de manejo de materiales los resultados pueden diferir en gran medida de la realidad.

En este artículo se presenta una extensión de ese modelo, al considerar T sistemas de manejo de materiales con diferente velocidad de operación. Cada entidad de manejo de materiales representa una agrupación de equipos de manejo de materiales con las mismas características en cuanto a velocidad, costo y unidad de carga.

Para el modelo de colas se incluye un departamento al inicio de la operación (departamento de carga) que cumple la función de ingresar los productos al sistema y un departamento de despacho para representar la salida del sistema (departamento de despacho). De acuerdo al sistema productivo planteado en el modelo que se presenta en este artículo, se consideran los siguientes supuestos:

- la demanda de cada producto es una variable aleatoria independientemente distribuida;
- los sistemas de manejo de materiales siguen una política de servicio *First Come - First Served* [FCFS], y se mantienen en la ubicación de la última entrega, hasta ser solicitados nuevamente;
- entre el departamento i y el departamento j existe un solo tipo de sistema de manejo de materiales;
- el tiempo de transporte entre del sistema del manejo de materiales es determinístico;
- todos los productos entran al sistema por el departamento de carga y salen de él por el departamento de despacho;
- los tiempos de procesamiento en cada departamento son independientes e igualmente distribuidos; y
- cada producto tiene una ruta de procesamiento única.

C. Descripción del modelo

La planta se modela como una red abierta de colas GI/G/1 (distribuciones generales de las tasas de arribos y de procesamiento, con un solo servidor), en la cual se dispone de T transportadores que se encargan del transporte de materiales entre los departamentos.

En la Figura 1 se muestra el flujo de los productos en el sistema, donde cada producto debe pasar a la respectiva entidad de manejo de materiales, para trasladarse al siguiente departamento. Un departamento puede recibir productos de diferentes entidades de manejo de materiales, que de ahora en adelante se llamarán *transportadores*. A su vez, un transportador puede recibir productos de diferentes departamentos.

En este sistema se tiene definido cuál transportador atiende cada flujo. Por ejemplo, la Figura 2 muestra la ruta de un producto por el sistema productivo.

D. Metodología del cálculo del WIP

El objetivo del presente modelo es evaluar el WIP de un sistema productivo mediante un modelo de colas G/G/1 para lo que se utilizó la aproximación de (Kramer & Lagenbach-Belz, 1976) basada en la ley de Little (Little, 1961). El WIP esperado de un departamento depende de los coeficientes de variación cuadráticos de arribos y de servicio del departamento y de la utilización de éste, para lo cual se requiere el tiempo esperado de servicio y la tasa de arribos del departamento.

Figura 1. Red de colas abierta con múltiples transportadores

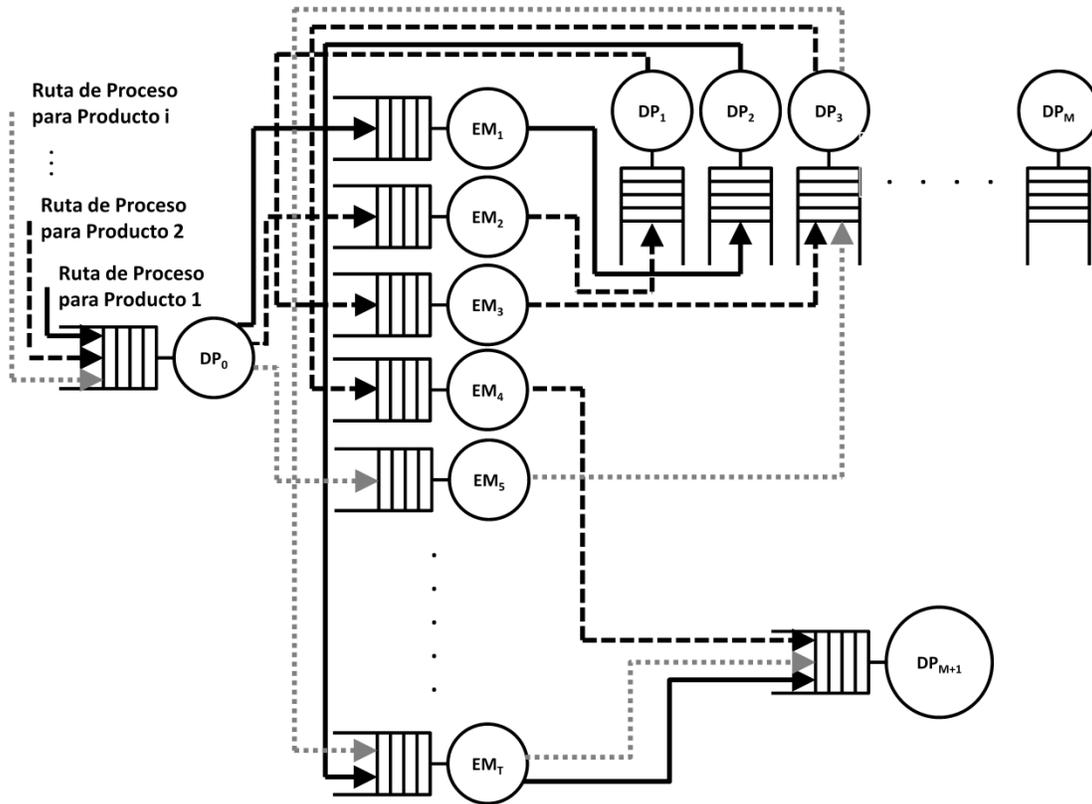
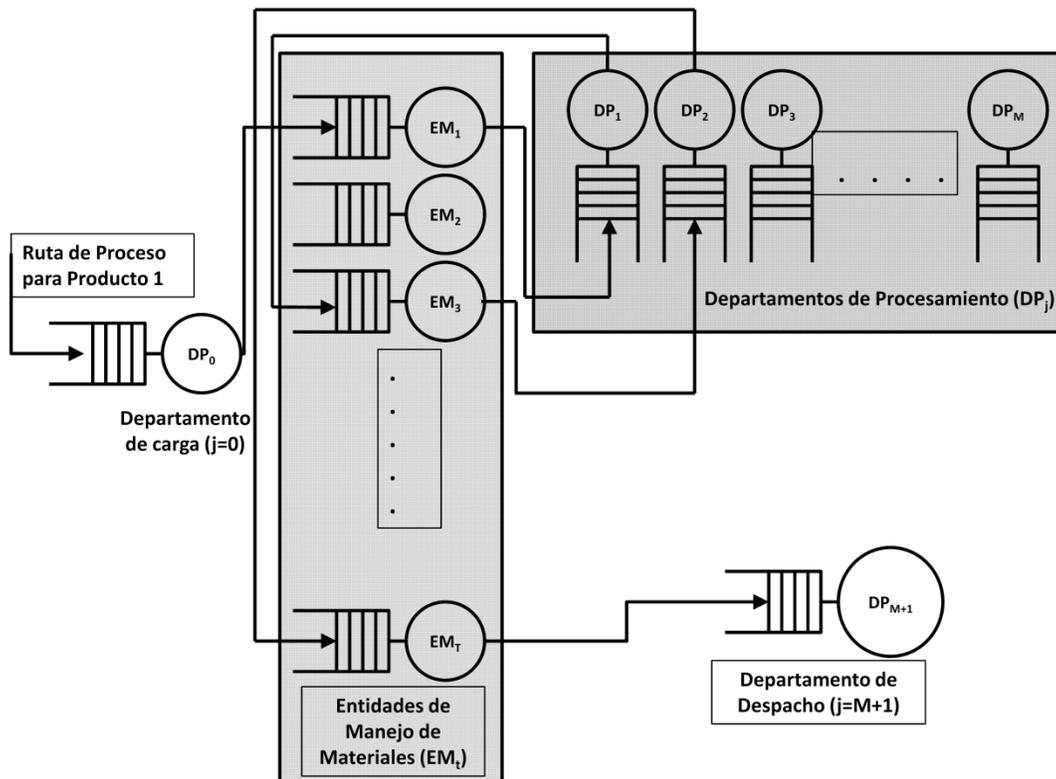


Figura 2. Proceso de un producto con ruta (inicio- DP_1 - DP_2 -salida)



La sección E explica los pasos para el cálculo de estos parámetros, los que a su vez son necesarios para calcular el WIP esperado en cada departamento y transportador (ver sección F). La sección lista los datos de entrada requeridos y explica el cálculo de: las tasas de arribo agregadas a los departamentos y a los transportadores, para lo que se deben construir diferentes matrices (ver E.1); el tiempo de servicio esperado para los departamentos (ver 0; el tiempo de servicio esperado para los transportadores (ver E.3); los coeficientes de variación cuadráticos para los tiempos de servicio para transportadores y departamentos (ver E.4); y los coeficientes de variación cuadráticos de las tasas de arribo (ver E.5).

E. Cálculo de los parámetros del modelo

En este modelo, es necesario contar con la siguiente información del sistema productivo para calcular el WIP:

N : número de productos procesados en el sistema.

M : número de departamentos de procesamiento en el sistema.

T : número de transportadores con que cuenta el sistema para el manejo de materiales.

$M + T + 2$: número de entidades del sistema

Rutas de los productos. Se indica la ruta de cada producto. Cabe resaltar que: un mismo producto no se puede procesar en el mismo departamento más de una vez; y todas las rutas deben empezar en 0 y terminar en $M + 1$.

Datos de la demanda. Para cada uno de los N productos se debe expresar el valor esperado de la demanda por hora (D_i) así como la desviación a la que está sujeta (σ_i).

Matriz de asignación de transportadores. Asigna cada uno de los T transportadores a las rutas que deben cubrir.

Tiempos de procesamiento esperados. Cada producto i se caracteriza por el tiempo de procesamiento esperado en el departamento j ($E[S_{ij}]$) y la desviación a la que está sujeto (σ_{ij}) en cada departamento donde es procesado.

Distancia entre Departamentos. Matriz donde cada entrada

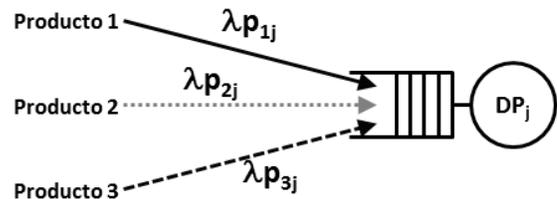
d_{fg} es la distancia rectilínea entre los departamentos f y g .

Velocidades de los transportadores. Para cada transportador se debe introducir la velocidad (v_t) en metros por hora. Este valor se toma como determinístico.

1) Tasas de arribo agregadas

Las tasas de llegada de cada producto al sistema se calculan de tal forma que se satisfaga la demanda. Las tasas de llegada a cada departamento (λ_j) se encuentran agregando las tasas de los productos entrantes a cada uno de éstos (Figura 3). Las tasas de llegada a los transportadores (λt_t) se encuentran agregando las tasas de llegada de los productos le han sido asignado (Figura 4).

Figura 3. Agregación tasas de arribos

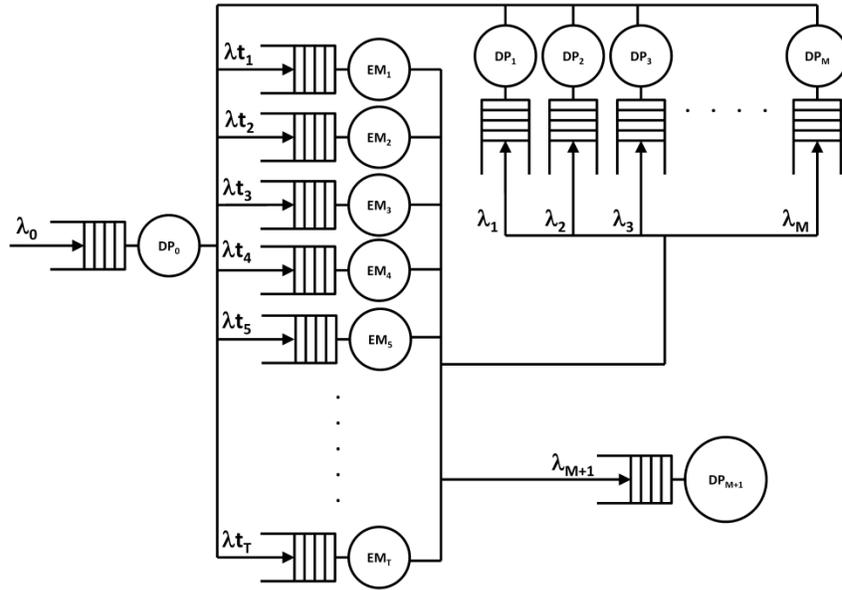


El proceso de agregar estas tasas es conocido como la superposición de los procesos de llegada individuales.

Para calcular la tasa de arribos agregada a cada entidad, se requiere los flujos de cada producto i que llegan a cada entidad j denotado como (λp_{ij}). Para hallar esto, se debe definir la matriz de probabilidades de que el producto i vaya de la entidad j a la entidad k (P_{jk}^i) y los flujos externos que lleguen del producto i a la entidad j (γ_j^i). El tamaño de las matrices λp_{ij} y γ_j^i no será sólo $(M + 2) * (M + 2)$ (número de departamentos), sino que también deben considerarse los T transportadores presentes.

En resumen, λp_{ij} y γ_j^i serán de el número de entidades $(M + T + 2) * (M + T + 2)$.

Figura 4. Tasas de arribos agregadas



a). Construcción de la matriz P_{jk}^i :

Paso 1. La probabilidad de que cualquier producto i pase de un departamento a otro es 0, debido a que debe pasar primero por una entidad de manejo de materiales. Entonces,

$$P_{jk}^i = 0 \quad \forall i, j, k$$

Restringida por:

$$0 \leq j \leq M + 1; 0 \leq k \leq M + 1$$

Paso 2. La probabilidad de flujo de cualquier producto i , desde cualquier departamento, hacia cualquier transportador, es una variable binaria definida por:

$$P_{jk}^i = \begin{cases} 1 & \text{si el producto } i \text{ se transporta en } k \text{ después de procesarse en } j \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad \forall i, j, k$$

Restringida por:

$$0 \leq j \leq M; M + 2 \leq k \leq M + T + 1$$

Paso 3. La probabilidad de flujo de cualquier producto i , desde el departamento de despacho (DP_{M+1}) hacia cualquier transportador es cero, debido a que el producto sale del sistema después de llegar a este departamento. Entonces,

$$P_{M+1,k}^i = 0 \quad \forall i, k$$

Paso 4. La probabilidad de flujo de que cualquier producto i pase de un transportador a un departamento es una función definida por:

$$P_{jk}^i = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{h=0}^M P_{hj}^i} & \text{si producto } i \text{ se procesa en } k \text{ luego de transportarse en } j \\ 0 & \text{si no} \end{cases} \quad \forall i, j, k$$

Restringida por:

$$M + 2 \leq j \leq M + T + 1; 0 \leq k \leq M + 1$$

Paso 5. La probabilidad de que cualquier producto i pase de un transportador a otro es 0. Intuitivamente,

$$P_{jk}^i = 0 \quad \forall i, j, k$$

Restringida por:

$$M + 2 \leq j \leq M + T + 1; M + 2 \leq k \leq M + T + 1$$

b). Construcción de γ_j^i

Este modelo considera una única entrada de materiales al sistema que es el departamento de carga (DP_0). Así, γ_j^i para cualquier producto i estará constituido por la demanda del producto i por hora en la primera posición (asignada al departamento de carga) y ceros en las demás.

c). Tasas de llegada de producto i al departamento j (λp_{ij})

Con base en Curry y Feldman (2009),

$$\lambda p_{ij} = (I - (P_{kj}^i)^T)^{-1} \gamma_j^i$$

Donde I es una matriz identidad de $(M + T + 2) \times (M + T + 2)$.

d). Tasa de arribos agregada al departamento j (λ_j)

Para el caso del departamento DP_0 , por ser la única entrada del sistema, recibe los flujos de material del entorno. En consecuencia, los flujos de producto λp_{i0} están determinados por la demanda de los productos (D_i). Por lo tanto,

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^N \lambda p_{i0}$$

Para los demás departamentos,

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^N \lambda p_{ij} \quad \text{para } 1 \leq j \leq M + 1$$

e). Tasa de arribos agregada al transportador t (λt_t)

$$\lambda t_t = \sum_{i=1}^N \lambda p_{ij} \quad \text{para } M + 2 \leq j \leq M + T + 1; \text{ donde } t = j - M - 1$$

2) Tiempo esperado de servicio en un departamento j ($E[S_j]$)

El valor esperado del tiempo de servicio para una unidad agregada en el departamento j está en función de las probabilidades de que éste atienda cada producto i y del tiempo de servicio para cada producto i en el departamento j ($E[S_{ij}]$).

La probabilidad de atender un producto i en el departamento j (P_{ij}) es el cociente entre la tasa de llegada de ese producto al departamento j y la tasa de arribos agregada del departamento j .

$$P_{ij} = \frac{\lambda p_{ij}}{\lambda_j}$$

El tiempo de servicio esperado del departamento j se calcula:

$$E[S_j] = \sum_{i=1}^N P_{ij} \times E[S_{ij}]$$

3) Tiempo esperado de servicio del transportador t ($E[St_t]$)

Este tiempo depende de la distancia entre los departamentos j y k y de la distancia desde el departamento visitado antes de j , puesto que el transportador t cuando termina un recorrido se queda en esa ubicación. La distancia al departamento j se maneja como un valor esperado en función de la probabilidad de que la última entrega sea en el departamento r y en función de la distancia entre el departamento r y el departamento j .

La probabilidad de que el último departamento visitado por el transportador t sea r fue derivada del trabajo de Raman, Nagalingam y Gurd (2009) y está dada por:

$$P_{rt} = \sum_{m=0}^M \frac{\lambda_{mrt}}{\lambda t_t}$$

Donde λ_{mrt} es el flujo por hora del departamento m al departamento r que se hace por medio de t .

Análogamente, la probabilidad de que ocurra un viaje entre el departamento j y el departamento k realizado por el transportador t es:

$$P_{jkt} = \frac{\lambda_{jkt}}{\lambda t_t}$$

Entonces, la probabilidad de que el transportador t realice un viaje del departamento r pase por j y termine en el departamento k , es:

$$P_{rjkt} = \sum_{m=0}^M \frac{\lambda_{mrt} \lambda_{jkt}}{\lambda t_t^2}$$

Ahora, se calcula el tiempo de viaje del trayecto del departamento r al departamento j y luego al departamento k realizado por el transportador t , similar al proceso de Raman, Nagalingam y Gurd (2009).

$$t_{rjt} = \frac{d_{rj}}{v_t}$$

$$t_{jkt} = \frac{d_{jk}}{v_t}$$

$$t_{rijt} = t_{rit} + t_{ijt}$$

$$t_{rjkt} = \frac{(d_{rj} + d_{jk})}{v_t}$$

Entonces,

$$E[St_t] = \sum_{r=1}^{M+1} \sum_{j=0}^M \sum_{k=1}^{M+1} P_{rjkt} t_{rjkt} \quad \forall t$$

4) Coeficientes de variación cuadráticos de los tiempos de servicio

Por identidad,

$$E[S^2] = E[S]^2 \times (1 + C_s^2)$$

Despejando C_s^2 ,

$$C_s^2 = \left(\frac{E[S^2]}{(E[S])^2} \right) - 1$$

a). Coeficiente de variación cuadrático del tiempo de servicio en el departamento j ($C_{s_j}^2$)

$$E[S_j^2] = \sum_{i=1}^N P_{ij} E[S_{ij}]^2 (1 + C_{s_{ij}}^2)$$

Entonces,

$$C_{s_j}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N P_{ij} E[S_{ij}]^2 (1 + C_{s_{ij}}^2)}{(\sum_{i=1}^N P_{ij} E[S_{ij}])^2} - 1 \quad \forall j$$

Donde,

$$C_{s_{ij}}^2 = \frac{\sigma_{ij}^2}{E[S_{ij}]^2}$$

b). Coeficiente de variación cuadrático del tiempo de servicio en el transportador t ($C_{st_t}^2$)

De manera análoga,

$$C_{st_t}^2 = \left(\frac{E[S_{t_t}^2]}{E[S_{t_t}]^2} \right) - 1$$

$$E[S_{t_t}^2] = \sum_{r=1}^{M+1} \sum_{j=0}^M \sum_{k=1}^{M+1} P_{rjkt} (t_{rjkt})^2$$

$$C_{st_t}^2 = \left(\frac{\sum_{r=1}^{M+1} \sum_{j=0}^M \sum_{k=1}^{M+1} P_{rjkt} (t_{rjkt})^2}{(\sum_{r=1}^{M+1} \sum_{j=0}^M \sum_{k=1}^{M+1} P_{rjkt} t_{rjkt})^2} \right) - 1 \quad \forall t$$

5) Coeficiente de variación cuadrático de las tasas de arribo

El coeficiente de variación cuadrático agregado se calcula como un promedio ponderado de los coeficientes

de variación cuadráticos de arribo de los flujos que entran al departamento j ($C_{a_{kj}}^2$). La ponderación se realiza como la probabilidad de que ocurra un flujo determinado hacia el departamento j (P_{kj}), por la proporción de flujo que representa para ese departamento.

El coeficiente de variación cuadrático de arribos del flujo del departamento k al departamento j ($C_{a_{kj}}^2$), está dado por la probabilidad de que ocurra ese flujo por el coeficiente de variación cuadrático de salida del departamento k ($C_{a_k}^2$), más la probabilidad de que no ocurra este flujo (Curry & Feldman, 2009).

$$C_{a_{kj}}^2 = P_{kj} C_{a_k}^2 + (1 - P_{kj})$$

Donde,

$$C_{a_k}^2 = (1 - u_k^2) C_{a_k}^2 + u_k^2 C_{s_k}^2$$

Entonces,

$$C_{a_j}^2 = \sum_{k=1}^{M+T+1} \frac{\lambda_k P_{kj}}{\lambda_j} (C_{a_{kj}}^2)$$

$$C_{a_j}^2 = \sum_{k=1}^{M+T+1} \frac{\lambda_k P_{kj}}{\lambda_j} (P_{kj} ((1 - u_k^2) C_{a_k}^2 + u_k^2 C_{s_k}^2) + 1 - P_{kj})$$

Donde,

$$P_{kj} = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda p_{ik} P_{kj}^i}{\lambda_j} \quad \forall j, k = 0, \dots, M + T + 1$$

$$u_k = \lambda_k \times E[S_k]$$

Lo que resulta en un sistema de ecuaciones que, según Curry y Feldman (2009), se puede aproximar de la siguiente manera:

$$C_{a_g}^2 \approx (I - Q^T)^{-1} \mathbf{b}$$

Donde,

$$Q = q_{kj} = \frac{\lambda_k P_{kj}^2 (1 - u_k^2)}{\lambda_j}$$

$$\mathbf{b} = \sum_{j=1}^{M+T+1} \frac{\lambda_k P_{kj}}{\lambda_j} ((P_{kj} u_k^2 C_{s_k}^2) + (1 - P_{kj}))$$

a). Coeficiente de variación cuadrático para las tasas de arribos al departamento j ($C_{a_j}^2$)

El coeficiente de variación cuadrático de la tasa de arribos al departamento 0, es el promedio ponderado de los coeficientes de variación cuadráticos de las tasas de llegada de los productos, ya que la única variación a la que se encuentra sujeto es a la de la demanda.

Con base en Curry y Feldman (2009),

$$C_{a_0}^2 = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda p_{i0}}{\lambda_0} C_i^2$$

Para los demás departamentos, se halla como:

$$C_{a_j}^2 = C_{a_g}^2 \text{ para } j = g, 1 \leq g \leq M + 1$$

b). Coeficiente de variación cuadrático para las tasas de arribos al transportador t (C_{at}^2)

$$C_{at}^2 = C_{a_g}^2 \text{ para todo } t = g - M - 1 \text{ y para } M + 2 \leq g \leq M + T + 1$$

F. Cálculo del *WIP*

Para calcular el valor esperado del *WIP* en el sistema productivo se debe calcular el *WIP* para cada departamento *j* y para cada transportador *t* de la siguiente forma:

$$E[WIP_j] \approx g_j(u_j, C_{a_j}^2, C_{s_j}^2) \times \left(\frac{C_{a_j}^2 + C_{s_j}^2}{2} \right) \left(\frac{u_j}{1 - u_j} \right) u_j + u_j$$

$$E[WIP_t] \approx g_t(u_t, C_{at}^2, C_{st}^2) \times \left(\frac{C_{at}^2 + C_{st}^2}{2} \right) \left(\frac{u_t}{1 - u_t} \right) u_t + u_t$$

Donde,

$$g_j(u_j, C_{a_j}^2, C_{s_j}^2) = \begin{cases} \exp \left\{ -\frac{2(1-u_j)(1-C_{a_j}^2)^2}{3u_j(C_{a_j}^2 + C_{s_j}^2)} \right\} & \text{para } C_{a_j}^2 < 1 \\ 1 & \text{para } C_{a_j}^2 \geq 1 \end{cases}$$

$$g_t(u_t, C_{at}^2, C_{st}^2) = \begin{cases} \exp \left\{ -\frac{2(1-u_t)(1-C_{at}^2)^2}{3u_t(C_{at}^2 + C_{st}^2)} \right\} & \text{para } C_{at}^2 < 1 \\ 1 & \text{para } C_{at}^2 \geq 1 \end{cases}$$

$$u_j = \lambda_j E[S_j]$$

$$u_t = \lambda_t E[S_t]$$

$$WIP \text{ TOTAL} = \sum_{j=0}^{M+1} E[WIP_j] + \sum_{t=1}^T E[WIP_t]$$

G. Problema de distribución de planta

El objetivo de este artículo no es desarrollar un algoritmo para el diseño de planta; se puede usar cualquier método de solución utilizando como función objetivo el *WIP* de la distribución de planta.

En este artículo se propone utilizar el modelo presentado para encontrar la mejor distribución de una planta minimizando el *WIP*. Se formula el problema como de optimización combinatoria. Específicamente se plantea como un problema de permutaciones sin restricciones, en el cual la función objetivo es el *WIP* y lo que se quiere encontrar es la distribución con el menor *WIP*.

Para esto se utiliza una modificación del algoritmo genético (Kochhar & Heragu, 1999). En él. se cambia la función de costo por el método del cálculo del *WIP* de la sección F, y se adapta a las estructuras de datos del modelo aquí propuesto.

IV. RESULTADOS

Al comparar el método para calcular el *WIP* de una distribución de planta presentado por Benjaafar (1998), con el método desarrollado en la sección III, se pretende evaluar si las distribuciones de planta encontradas mediante el método aquí propuesto tienen un menor *WIP* que las encontradas por Benjaafar (1998).

Para esto se emplea la metodología de diseño de experimentos expuesta por Gutierrez y de la Vara (2008) para un diseño completamente al azar con un solo factor (DCA).

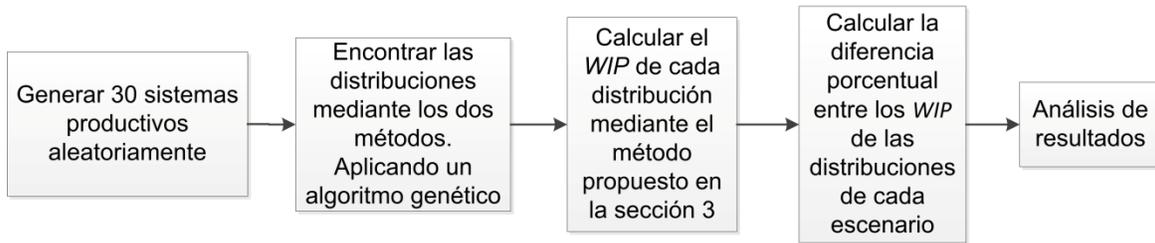
A continuación se presenta el experimento (sección A), los resultados obtenidos (sección B) y la interpretación y análisis de resultados (sección C).

A. Experimento

Tabla 2. Caracterización del experimento

Diseño completamente al azar	
Problema	Estudiar si el método propuesto en la sección 3, es mejor al método presentado por Benjaafar (1998)
Variable de Respuesta	Diferencia porcentual del <i>WIP</i>
Factor	Método
Niveles del Factor	• Método propuesto en la sección 3 • Método presentado por Benjaafar (1998)
Número de Réplicas	30

Figura 5. Pasos del experimento



Se generaron 30 sistemas productivos de manera aleatoria para obtener una muestra representativa. Las características de cada escenario son:

- número de transportadores,
- velocidad de los transportadores,
- matriz de asignación de los transportadores,
- número de departamentos,
- número de productos,
- demanda esperada de los productos,
- desviación de la demanda de los productos,
- tiempos esperados de procesamiento de cada producto en cada departamento,
- desviación de los tiempos esperados de procesamiento de cada producto en cada departamento,
- ruta de producción de cada producto, y
- distancia entre departamentos.

El método que se presentó en la sección III se programó en *Matlab*. Además, para evaluar el método de Benjaafar se hicieron dos modificaciones al método de la sección III. Primero, se limitó a un único sistema de manejo de materiales; segundo, éste se transporta a una velocidad igual a la suma de las velocidades de los sistemas de manejo de materiales disponibles en el sistema productivo.

Para cada escenario se diseñaron dos distribuciones de planta empleando el algoritmo genético planteado en la sección III.G. La primera distribución utiliza el método de cálculo de WIP desarrollado en la sección III; la segunda, el método propuesto por Benjaafar (1998).

Cada distribución se evaluó empleando el método propuesto en la sección III, pues él genera una estimación más aproximada, al considerar el efecto de tener diferentes sistemas de manejo de materiales.

Luego se calculó la diferencia porcentual del WIP del diseño encontrado a partir del método de Benjaafar (1998), con respecto al WIP del diseño encontrado a partir del método propuesto en la sección III, para cada escenario.

B. Resultados Obtenidos

La Tabla 3 presenta los resultados del experimento arrojados por Matlab, para los 30 sistemas productivos.

Tabla 3. Resultados del experimento

Escenario	$\Delta\%WIP$
1	28.32
2	7.38
3	5.36
4	6.21
5	-0.10
6	6.21
7	16.65
8	1.71
9	6.52
10	8.47
11	3.82
12	1.03
13	6.36
14	163.52
15	8.67
16	9.43
17	22.35
18	6.75
19	13.02
20	90.05
21	0.62
22	10.69
23	2.37
24	61.48
25	176.46
26	3.07
27	7.60
28	0.80
29	55.53
30	28.34

C. Análisis de resultados

Para encontrar diferencias significativas en el desempeño de los métodos se realizó la siguiente prueba de hipótesis mediante el software *Minitab*.

Hipótesis nula (H_0): La media de $\Delta\%WIP = 0$.

$$H_0: \mu = 0$$

Hipótesis Alternativa (H_a): media de $\Delta\%WIP > 0$

$$H_a: \mu > 0$$

Valor crítico $t_{0,05,29} = 1.6991$

Estadístico de prueba $t_0 = 3.1258$

Dado que el valor del estadístico de prueba es mayor que el valor crítico, se rechaza H_0 con un nivel de confianza del 95%, lo que demuestra que el método propuesto en éste artículo es estadísticamente mejor que el método propuesto por Benjaafar (1998), pues encuentra distribuciones con menor WIP.

Para aportar un criterio cuantitativo respecto de la bondad de este método, se establece que el WIP de una distribución encontrado mediante el, será un 11.54% menor que el WIP de una distribución encontrada mediante el método de Benjaafar (1998).

V. CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN FUTURA

En este artículo se presentó una manera para obtener una distribución de planta que permita minimizar los niveles de inventario de trabajo en proceso para un determinado sistema de producción. Para esto se extendió el modelo de colas propuesto por Benjaafar (1998), considerando diferentes entidades de manejo de materiales, en vez de solo una.

Se demostró que el modelo presentado permite encontrar diseños de planta con mejor desempeño en este indicador que los encontrados por medio de un modelo que considere un solo sistema de manejo de materiales. Esto, permite evaluar con mayor precisión los sistemas productivos de la actualidad y amplía la posibilidad de que se profundice en esta línea de investigación y se obtengan modelos cada vez más acercados a la realidad, con mayores usos prácticos en la industria.

Las posibles extensiones a este modelo para mejorar su aproximación, se obtienen mediante la relajación de los diferentes supuestos que se usaron. Además, el modelo presenta la oportunidad de cambiar el valor objetivo que se busca minimizar. Aunque el nivel del WIP representa un indicador deseable, la variación entre los diferentes productos procesados puede hacer que otro objetivo sea más relevante. En ese caso, podría desagregarse el WIP en

los diferentes productos para hallar el costo del mismo y así encontrar una distribución que minimice el costo del WIP.

Otro efecto que podría considerarse son las diferencias que puede haber entre las unidades de carga de los transportadores y los lotes de producción de los departamentos. En el modelo presente se asume que el transporte y el procesamiento se hacen para tamaños de lote que permanecen constantes durante todo el proceso. El considerar estas diferencias resulta en una mayor aplicabilidad del modelo.

Por último, cabe señalar que el nivel esperado de WIP en cada departamento no solo es útil como objetivo a minimizar para el diseño de la planta sino que también lo es para calcular el espacio que debe destinarse en cada departamento para el almacenamiento de este inventario. Tener en cuenta este requerimiento podría revelar información de elementos de diseño para tomar en cuenta al momento de elaborar la distribución de planta detallada. Por lo tanto, encontrar la mejor distribución que minimice el WIP y tenga en cuenta el espacio requerido por éste es un resultado deseable en la industria.

VI. REFERENCIAS

- Abedzadeh, M., Mazinani, M., Moradinasab, N., & Roghanian, E. (2012). Parallel variable neighborhood search for solving fuzzy multi-objective dynamic facility layout problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Recuperado de <http://rd.springer.com/article/10.1007/s00170-012-4160-x>
- Aderoba, A. (1997). A sequential model for concurrent expansion in machinery and buildings using reinvested earnings. *Integrated Manufacturing Systems*, 8(4), 223-230.
- Afentakis, P. (1989). A loop layout design problem for flexible manufacturing systems. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 1(2), 175-196.
- Askin, R., & Krisht, A. (1994). Optimal operation of manufacturing systems with controlled work-in-process levels. *International Journal of Production Economy*, 32(7), 1637-1653.
- Bai, S., & Gershwin, S. (1994). Scheduling manufacturing systems with work-in-process inventory control: multiple-part-type systems. *International Journal of Production Research*, 32(2), 365-386. Disponible en <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207549408956938#preview>
- Balakrishnan, J. (1998). Dynamic Layout Algorithms: A State-of-the-art Survey. *Omega*, 26(4), 507-521. Disponible en http://dspace.ucalgary.ca/bitstream/1880/46669/1/Balakrishnan_OMEGA_1998.pdf
- Balakrishnan, J., & Cheng, C. H. (2005). Dynamic cellular manufacturing under multiperiod planning horizons. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 16(5), 516-530.
- Balakrishnan, J., & Cheng, C. H. (2009). The dynamic plant layout problem: Incorporating rolling horizons and forecast uncertainty. *Omega*, 37(1), 165-177.
- Balakrishnan, J., Cheng, C. H., & Conway, D. G. (2000). An improved pair-wise exchange heuristic for the dynamic plant layout problem. *International Journal of Production Research*, 38(13), 3067-3077.
- Baykasoglu, A., & Gindy, N. N. (2001). A simulated annealing algorithm for dynamic layout problem. *Computers & Operations Research*, 28(4), 1403-

- 1426.
- Benjaafar, S. (1998). Design of manufacturing plant layouts with queuing effects. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, [Leuven, Bélgica] (pp. 260-265). Piscataway, NJ: IEEE.
- Braglia, M. (1996). Optimization of a simulated-annealing-based heuristic for single row machine layout problem by genetic algorithm. *International Transactions in Operational Research*, 3(1), 37-49.
- Braglia, M., Zanoni, S., & Zavanella, L. (2005). Layout design in dynamic environments: analytical issues. *International Transactions in Operational Research*, 12(1), 1-19.
- Chen, G. Y. (2007). Multi-objective Evaluation of Dynamic Facility Layout Using Ant Colony Optimization [PhD Thesis]. University of Arlington, Texas
- Chen, G. Y., & Rogers, K. J. (2009). Proposition of Two Multiple Criteria Models Applied to Dynamic Multi-objective Facility Layout Problem Based On Ant Colony Optimization. 2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management [Hong Kong], (pp. 1553-1557). Piscataway, NJ: IEEE.
- Chen, G., & Rogers, J. (2009). Managing Dynamic Facility Layout with Multiple Objectives. PICMET 2009 Proceedings (pp. 1175-1184). Portland, OR: Portland State University
- Chen, M. (1998). A mathematical programming model for system reconfiguration in a dynamic cellular manufacturing environment. *Annals of Operations Research*, 77(0), 109-128.
- Chen, T. M., Chen, C. C., & Chuang, S. P. (2011). A simulated annealing-based approach for dynamic facility planning. En *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2010 IEEE International Conference on (pp. 1291-1294). Piscataway, NJ: IEEE
- Corry, P., & Kozan, E. (2004). Ant Colony Optimization for Machine Layout Problems. *Computational Optimization and Applications*, 29(3), 287.
- Curry, G. L., & Feldman, R. M. (2009). *Manufacturing Systems Modeling and Analysis*. New York, NY: Springer.
- da Silva, G. C., Bahiense, L., Ochi, L. S., & Boaventura-Netto, P. O. (2012). The dynamic space allocation problem: Applying hybrid GRASP and Tabu search metaheuristics. *Computers & Operations Research*, 39(3), 671-677.
- Dong, M., Wu, C., & Hou, F. (2009). Shortest path based simulated annealing algorithm for dynamic facility layout problem under dynamic business environment. *Expert Systems with Applications*, 36(8), 11221-11232.
- Dunker, T., Radons, G., & Westkamper, E. (2005). Combining evolutionary computation and dynamic programming for solving a dynamic facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 165(1), 55-69.
- Dweri, F., & Meier, F. A. (1996). Application of fuzzy decision-making in facilities layout planning. *International Journal of Production Research*, 34(11), 3207-3225.
- El-Rayes, K., & Said, H. (2009). Dynamic site layout planning using approximate dynamic programming. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23(2), 119-127.
- Erel, E., Ghosh, J., & Simon, J. (2003). New heuristic for the dynamic layout problem. *Journal of the Operational Research Society*, 54(12), 1275-1282.
- Fu, M., & Kaku, B. (1997, enero). Minimizing work-in-process and material handling in the facilities layout problem. *IIE Transactions*, 1-29.
- Guo, R.-S., Chiang, D., & Pai, F.-Y. (2007). A WIP-based exception-management model for integrated circuit back-end production processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(11-12), 1263-1274.
- Gutierrez, H., & de la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México DF., México: McGraw-Hill.
- Heragu, S. (2006). *Facilities Design*. Lincoln, NE: iUniverse.
- Hicks, P., & Lowan, T. (1976). CRAFT-M for layout re-arrangement. *Industrial Engineering*, 8(5), 30-35.
- Jaramillo, J. R., & McKendall Jr., A. R. (2004). The Industrial Engineering Research Conference Annual Proceedings [CD]. Houston, TX: IERC
- Jaramillo, J., & McKendall Jr., A. (2010). The generalized machine layout problem. *International Journal of Production Research*, 48(16), 4845-4859.
- Jithavech, I., & Krishnan, K. K. (2010). A simulation-based approach for risk assessment of facility layout designs under stochastic product demands. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(1-4), 27-40.
- Jolai, F., Taghipour, M., & Javadi, B. (2011). A variable neighborhood binary particle swarm algorithm for cell layout problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(1-4), 327-339.
- Kia, R. (2011). A simulated annealing for solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system. *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2011 IEEE International Conference on, (pp. 1113-1117). Piscataway, NJ: IEEE
- Kochhar, J. S., & Heragu, S. S. (1999). Facility layout design in a changing environment. *International Journal of Production Research*, 37(11), 2429-2446.
- Kramer, W., & Lagenbach-Belz, M. (1976). Approximate formulae for the delay in the queuing system GI/G/1. [ponencia en 8th ITC]. Recuperado de <http://www.itc-conference.org/fileadmin/ITCBibDatabase/1976/kraemer761.pdf>
- Krishnan, K. K., Cheragi, S. H., & Nayak, C. N. (2008). Solving dynamic facility layout problems using dynamic from between charts. *California Journal of Operations Management*, 6(1), 115-122
- Krishnan, K. K., Jithavech, I., & Liao, H. (2009). Mitigation of risk in facility layout design for single and multi-period problems. *International Journal of Production Research*, 47(21), 5911-5940.
- Kulturel-Konak, S. (2007). Approaches to uncertainties in facility layout problems: Perspectives at the beginning of the 21st Century. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18(2), 273-284.
- Kulturel-Konak, S., Smith, A. E., & Norman, B. A. (2007). Bi-objective facility expansion and relayout considering monuments. *IIE Transactions*, 39, 747-761.
- Lacksonen, T. A. (1997). Preprocessing for static and dynamic facility layout problems. *International Journal of Production Research*, 35(4), 1095-1106.
- Lacksonen, T. A., & Enscore Jr., E. E. (1993). Quadratic assignment algorithms for the dynamic layout problem. *International Journal of Production Research*, 31(3), 503-517.
- Li, W., & Smith, J. M. (1994). Quadratic Assignment and Related Problems. En P. Pardalos & H. Wolkowica [Ed.] *DIMACS Series Indiscrete Mathematics*, V.16 (pp. 221-236). Providence, RI: AMS
- Little, J. D. (1961). A proof of the queuing formula $L=\lambda W$. *Operations Research*, 9(3), 383-387.
- Ma, H., & Zhang, D. (2010). The dynamics facility layout study based on cellular manufacturing. 2010 *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation* [Changsha City] (pp. 862-865). Washington DC: IEEE Computer Society
- Mazinani, M., Abedzadeh, M., & Mohebbali, N. (2012). Dynamic facility layout problem based on flexible bay structure and solving by genetic algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI 10.1007/s00170-012-4229-6.
- McKendall Jr., A. R., & Hakobyan, A. (2010). Heuristics for the dynamic facility layout problem with unequal-area departments. *European Journal of Operational Research*, 201(1), 171-182.
- McKendall Jr., A. R., & Shang, J. (2006). Hybrid ant systems for the dynamic facility layout problem. *Computers & Operations Research*, 33(3), 790-803.
- McKendall Jr., A. R., Shang, J., & Kuppusamy, S. (2006). Simulated annealing heuristics for the dynamic facility layout problem. *Computers & Operations Research*, 33(8), 2431-2444.
- Meller, R., & Kai-Yin, G. (1996). The facility layout problem: recent and emerging trends and perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(5), 351-366.
- Meller, R., Narayanan, V., & Vance, P. (1998). Optimal facility layout design. *Operations Research Letters*, 23 (3-5), 117-127.
- Meng, G., Heragu, S. S., & Zijm, H. (2004). Reconfigurable layout problem. *International Journal of Production Research*, 42(22), 4709-4729.
- Moslemipour, G., & Lee, T. S. (2011, enero). Intelligent design of a dynamic machine layout in uncertain environment of flexible manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. doi:10.1007/s10845-010-0499-8
- Pillai, V. M., Hunagund, I. B., & Krishnan, K. K. (2011). Design of robust layout for Dynamic Plant Layout Problems. *Computers & Industrial Engineering*, 61(3), 813-823.
- Raman, D., Nagalingam, S.V., & Gurd, B.W. (2009). A genetic algorithm and queuing theory based methodology for facilities layout problem. *International Journal of Production Research*, 47(20), 5611-5635.

- Rawabdeh, I., & Tahboub, K. (2006). A new heuristic approach for a computer-aided facility layout. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 17(7), 962-986.
- Rezazadeh, H., Ghazanfari, M., Saidi-Mehrabad, M., & Jafar, S. (2009). An extended discrete particle swarm optimization algorithm for the dynamic facility layout problem. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 10(4), 620-629.
- Ripon, K. S., Glette, K., Hovin, M., & Torresen, J. (2010a). Dynamic Facility Layout Problem with Hybrid Genetic Algorithm. IEEE 9th International Conference on Cybernetic Intelligent Systems [Oslo, Noruega] (pp. 1-6). Piscataway, NJ: IEEE.
- Ripon, K. S., Glette, K., Hovin, M., & Torresen, J. (2011). Dynamic facility layout problem under uncertainty: a Pareto-optimality based multi-objective evolutionary approach. *Central European Journal of Computer Science*, 1(4), 375-386.
- Ripon, K. S., Glette, K., Hovin, M., & Torresen, J. (2010b). A genetic algorithm to find Pareto-optimal solutions for the dynamic facility layout problem with multiple objectives. *ICONIP, Lecture Notes in Computer Science*, 6443, 642-651.
- Ripon, K. S., Glette, K., Koch, D., Hovin, M., & Torresen, J. (2011). Genetic algorithm using a modified backward pass heuristic for the dynamic facility layout problem. *PALADYN Journal of Behavioral Robotics*, 2(3), 164-174.
- Rosenblatt, M. J. (1986). The dynamics of plant layout. *Management Science*, 32(1), 76-86.
- Sahin, R., & Turkbey, O. (2009). A new hybrid tabu-simulated annealing heuristic for the dynamic facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 47(24), 6855-6873.
- Sahin, R., Ertogral, K., & Turkbey, O. (2012). A simulated annealing heuristic for the dynamic layout problem with budget constraint. *Computers & Industrial Engineering*, 59(2), 308-313.
- Saidi-Mehrabad, M., & Safaei, N. (2007). A new model of dynamic cell formation by a neural approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(9-10), 1001-1009.
- Sepheri, M., & Nahavand, N. (2007). Critical WIP loops: a mechanism for material flow control in flow lines. *International Journal of Production Research*, 45(12), 2759-2773.
- Shahbazi, E. (2010). Mathematical Modeling and Solution Development for "Dynamic Facility Layout Problem" in Job Shop Process Using Meta-heuristic Algorithms. 2010 40th International Conference on Computers and Industrial Engineering [Awaji City], (pp. 1-6). Piscataway, NJ: IEEE.
- Singh, S. P. (2010). An Approximate Algorithm for Solving Dynamic Facility Layout Problem. *Communications in Computer and Information Science*, 101, 504-509.
- Singh, S., & Sharma, R. (2006). A review of different approaches to the facility layout problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30(5-6), 425-433.
- Tian, Z., Li, H., & Zhao, Y. (2010). Optimization of continuous dynamic facility layout problem with budget constraints. 2010 2nd International Conference on Information Science and Engineering [Hangzhou] (pp. 387-390). Piscataway, NJ: IEEE.
- Urban, T. L. (1998). Solution procedures for the dynamic facility layout problem. *Annals of Operations Research*, 76(0), 323-342.
- Wang, C.-T. (1999). *Static and dynamic facility layout problems* [PhD Thesis], University of Michigan
- Wang, L. (2011). Combining facility layout redesign and dynamic routing for job-shop assembly operations. *Assembly and Manufacturing (ISAM), 2011 IEEE International Symposium on Management* (pp. 1-6). Piscataway, NJ: IEEE.
- Yang, C.-L., & Chuang, S.-P. (2011). A genetic algorithm for dynamic facility planning in job shop manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52(1-4), 303-309.
- Zouein, P. P., & Tommelein, I. D. (1999). Dynamic layout planning using a hybrid incremental solution method. *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(6), 400-408.

VII. CURRÍCULOS

Daniel Cardona. Estudiante de ingeniería Industrial de la Universidad Icesi (Cali, Colombia). Se desempeña como analista de ingeniería industrial en Baxter. Entre sus áreas de interés se encuentran las finanzas corporativas y la distribución de planta.

Juan Diego Forero. Estudiante de ingeniería Industrial de la Universidad Icesi. Se desempeña como analista de planeación financiera en Colgate Palmolive. Entre sus áreas de interés se encuentran las finanzas corporativas y la distribución de planta.

Luis Felipe Cardona. Ingeniero Industrial (2011) y estudiante de Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi (Colombia). Se desempeña como asistente de investigación de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Icesi. Entre sus áreas de interés se encuentran la ingeniería de bodegas (*Warehousing*), la distribución de planta y la optimización aplicada.

Leonardo Rivera, Ph.D. Jefe del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad Icesi de Cali. Ingeniero Industrial de la Universidad del Valle (1994), Máster en Ingeniería Industrial con énfasis en Producción, Logística y Distribución del Georgia Institute of Technology, (EE.UU. 1996) y Doctor en Ingeniería Industrial - Sistemas de Manufactura del Virginia Polytechnic Institute and State University, (EE.UU. 2006). Entre sus áreas de interés están la *Lean Manufacturing*, la distribución de planta y la ingeniería de bodegas (*Warehousing*).