

Optimización de la distribución en planta con formulación QAP y simulación de eventos discretos

Plant layout optimization with QAP formulation and discrete event simulation

Yesid Anacona-Mopan¹
Jhon Segura-Dorado²
Helmer Paz-Orozco³

¹Corporación Universitaria Comfacaucá (Colombia). Correo electrónico: [yanacona@unicomfacaucá.edu.co](mailto: yanacona@unicomfacaucá.edu.co)
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7255-8503>

²Corporación Universitaria Comfacaucá (Colombia). Correo electrónico: [jsegura@unicomfacaucá.edu.co](mailto: jsegura@unicomfacaucá.edu.co)
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3806-6921>

³Corporación Universitaria Comfacaucá (Colombia). Correo electrónico: [hpaz@unicomfacaucá.edu.co](mailto: hpaz@unicomfacaucá.edu.co)
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4661-8538>

Recibido: 19-05-2022 Aceptado: 20-09-2022

Cómo citar: Anacona-Mopan, Yesid; Segura-Dorado, Jhon; Paz-Orozco, Helmer (2023). Optimización de la distribución en planta con formulación QAP y simulación de eventos discretos. *Informador Técnico*, 87(1), 13-28.
<https://doi.org/10.23850/22565035.4814>

Resumen

Un diseño apropiado de las instalaciones de fabricación puede aumentar la eficiencia de las operaciones internas de una empresa, mediante la optimización de los costes de manipulación y flujo de materiales. En este trabajo se abordó la planificación de la distribución de las instalaciones (FLP, por sus siglas en inglés), modelada como un problema de asignación cuadrática (QAP, por sus siglas en inglés), aplicado a una empresa dedicada a la producción de licores. El problema se resolvió utilizando la Técnica de Asignación Relativa Computarizada de Instalaciones, que pertenece a los algoritmos heurísticos, con la cual se logró determinar la mejor asignación de las áreas para la planta, teniendo en cuenta las distancias recorridas y los costos de flujo de materiales. Posteriormente, se realizó una simulación para evaluar la nueva distribución ante las actividades diarias de la empresa, teniendo en cuenta la variabilidad de los tiempos de carga y descarga. Los resultados de la simulación sugieren que, si se aplica la nueva distribución, los costes y los tiempos del flujo de materiales se reducirían en un 13,22 % y un 4,28 %, respectivamente.

Palabras clave: distribución en planta; problema de asignación cuadrática; proceso productivo; simulación; investigación de operaciones; optimización.

Abstract

A suitable design of manufacturing facilities can increase the efficiency of a company's internal operations by optimizing material handling and flow costs. This paper addresses the facility layout planning problem (FLP), modeled as a quadratic allocation problem (QAP), applied to a company dedicated to the production of liquors. The problem was solved using the Computerized Relative Allocation of Facilities Technique that belongs to the heuristic algorithms, which allowed us to determine the best allocation of the departments, considering the

distances traveled and the material flow costs. Subsequently, a simulation was carried out to evaluate the new distribution given the company's daily activities, considering the variability of loading and unloading times. The simulation results suggest that, if the new layout is implemented, material flow costs and times would be reduced by 13.22 % and 4.28 %, respectively.

Keywords: plant layout; quadratic allocation problem; production process; simulation; operations research; optimization; production process; optimization.

1. Introducción

Las decisiones sobre la disposición de las instalaciones son importantes, costosas y normalmente difíciles de cambiar o adaptar (Sembiring *et al.*, 2019). La administración de los modelos de negocios conlleva a decisiones y problemas que deben resolverse de manera estratégica para la manutención exitosa de las compañías. Entre esas decisiones, es de gran relevancia satisfacer las necesidades de los clientes en cuanto a la calidad del producto y del servicio (Davis-Sramek *et al.*, 2008; Paz-Orozco; Segura-Dorado, 2021).

Con el rápido crecimiento de la demanda, las organizaciones necesitan mejorar el uso de los recursos para competir con el mercado emergente (Ramírez *et al.*, 2019). Uno de los métodos para la mejora de los procesos es la planificación de la distribución en planta, que permite mejorar la producción, la productividad y la eficiencia en un 15 a 25 % (Samanta *et al.*, 2018). Además, permite disminuir los costos de manipulación de materiales (CMM) entre un 10 a 30 % (Tarigan *et al.*, 2020).

Por el contrario, una distribución ineficaz puede significar hasta un 36 % en los CMM (Ripon *et al.*, 2013). Además, Izadinia y Eshghi (2016) demuestran que se puede perder en un 35 % la eficiencia. Las empresas pueden contar con gran número de máquinas, diferentes departamentos y variedad de productos, aspectos que dificultan la distribución de las instalaciones en un flujo específico (Liu *et al.*, 2020). Lo anterior conlleva un problema de distribución de las instalaciones o *facility layout problem* (FLP) (Kusiak; Heragu, 1987). Este tradicionalmente se ha modelado de diferentes formas, como un problema de asignación cuadrática (QAP), problema cuadrático de cobertura de conjuntos (SCP por sus siglas en inglés), programación lineal entera (PLE), programación entera mixta (MIP por sus siglas en inglés) y teoría de grafos (Kusiak; Heragu, 1987). Para esta investigación, se utilizó el problema de asignación cuadrática (QAP), que fue formulado por primera vez por Koopmans y Beckmann (1957). Este utiliza el centroide de una ubicación como punto de referencia para evaluar la distancia entre pares de instalaciones potenciales (Chiang; Chiang, 2018), lo que representa uno de los problemas más investigados, debido a la complejidad y a su potencial impacto en aplicaciones del mundo real (Paredes *et al.*, 2016).

El objetivo del QAP es encontrar la asignación óptima de n instalaciones (plantas, departamentos o estaciones de máquinas), a n emplazamientos, para minimizar el coste de manipulación de materiales, expresado como el producto del flujo de trabajo y la distancia de desplazamiento (Chiang; Chiang, 2018). Por lo tanto, las soluciones óptimas son difíciles de calcular en un tiempo razonable (Anjos; Vieira, 2017). Por tal motivo, el problema se resolvió utilizando la Técnica de Asignación Relativa Computarizada de Instalaciones, que pertenece a los algoritmos heurísticos (Halim; Wulandari, 2018; Leyva *et al.*, 2016; González-Longoria, 2016). Estos procedimientos, aunque no proporcionan la solución óptima global, pueden producir buenas respuestas dentro de límites de tiempo razonables. Estos métodos de construcción crean permutaciones subóptimas, que comienzan con una permutación parcial, que está inicialmente vacía. La permutación se amplía mediante asignaciones repetitivas basadas en el criterio de selección de conjuntos, hasta que esté completa (Zaied; Shawky, 2014).

Autores como Achary *et al.* (2021) realizan un estudio de rendimiento de enfoques metaheurísticos para un problema de asignación cuadrática. Hameed *et al.* (2021) proponen un método híbrido, que integra un

algoritmo de evolución diferencial discreta con un algoritmo de búsqueda tabú, para el problema de asignación cuadrática para localizar de las áreas de la planta. Cubukcuoglu *et al.* (2021) abordan la renovación del diseño de un hospital como un problema de asignación cuadrática para minimizar las distancias; Achary *et al.* (2021) proponen un enfoque de solución comparativa con programación cuadrática y genética para el problema de localización de centros sanitarios multiobjetivo; Samanta *et al.* (2018) utilizan el problema de asignación cuadrática de ubicación, que es dependiente de dos objetivos: formulación y solución, utilizando un algoritmo modificado de colonia de abejas artificiales; y Koopmans y Beckmann, (1957) formularon el problema de QAP como un modelo matemático para la localización de un conjunto de actividades económicas indivisibles.

Por otro lado, los modelos heurísticos validados con simulación de eventos discretos han mostrado tendencias favorables para mejorar el rendimiento de los resultados (Halawa *et al.*, 2020). Así mismo la simulación es una herramienta eficaz para validar el diseño de planta propuesto (Halawa *et al.*, 2021).

En este artículo se aborda el problema de distribución en planta mediante una metodología de dos fases: en la primera se utiliza un enfoque heurístico para resolver el problema de FLP, modelado como un problema de QAP. En la segunda fase, se utiliza la simulación discreta mediante el software FlexSim para validar el comportamiento de la distribución resultante de la fase uno.

2. Revisión de literatura

El problema del diseño de las instalaciones se ha estudiado durante décadas. Esto se debe a su contribución significativa a la productividad de la industria en términos de costos indirectos, tiempo y seguridad (Liu *et al.*, 2020). Koopmans y Beckmann (1957) propusieron el Problema de Asignación Cuadrática por primera vez como un modelo matemático para la ubicación de un conjunto de actividades económicas indivisibles. Loiola *et al.* (2007) presentan un estudio exhaustivo sobre QAP, en el que se afirma que muchos problemas de la vida real en diversas áreas, como la localización de instalaciones o el análisis combinatorio de datos, se modelan como QAP. Se exponen y clasifican algunas de las formulaciones de QAP más importantes y se ofrece un análisis detallado de las técnicas de solución exactas y heurísticas, incluidas las estrategias metaheurísticas. También utilizan la programación lineal entera mixta de propósito general para resolver QAP. Se obtienen diferentes tipos de formulaciones al utilizar técnicas de linealización para encontrar límites inferiores ajustados y un rendimiento eficiente para resolver problemas de prueba en tiempos razonables.

Lakehal *et al.* (2021) utilizaron un modelo de asignación cuadrática para optimizar el diseño de la planta de proceso, el modelo resultante se resuelve mediante un método de recocido simulado. Hunagund *et al.* (2018) adaptaron una forma flexible de la búsqueda tabú al problema de asignación cuadrática con diferentes valores de parámetros. También implementaron un sistema híbrido de hormigas basado en la población, con un tamaño fijo de colonia, para una formulación basada en QAP, en el problema de diseño de instalaciones. Forghani *et al.* (2012) presentaron un modelo donde la disposición de las instalaciones se obtiene integrando el problema de diseño de instalaciones, y el problema de asignación cuadrática, proponiendo un método heurístico para la resolución. Matai *et al.* (2021) consideraron un problema de diseño de instalaciones de varias filas como QAP, y utilizaron un solucionador no lineal. Zhao y Wallace (2014) integran el QAP con el problema de asignación de flujo en una incertidumbre de demanda insuficiente, representada en niveles discretos, aunque no se sugiere un método de solución específico para resolver el QAP. Benjaafar y Sheikhzadeh (2000) proponen un enfoque de programación estocástica para la formulación QAP generalizada, donde los volúmenes de flujo asignados entre departamentos también son variables de decisión. Además, incluyen una restricción de robustez en su formulación.

3. Metodología

La metodología utilizada para abordar el problema se dividió en dos fases: en la primera, se utilizó un enfoque heurístico para resolver el problema (FLP), que es modelado como un QAP. Como resultado, se obtuvo la mejor ubicación de los departamentos con el mínimo coste de asignación. En la segunda fase, se utilizó la simulación discreta, utilizando el software FlexSim para validar el comportamiento de la distribución resultante de la fase uno. La simulación es utilizada para observar la aleatoriedad en los tiempos de carga y descarga de los montacargas, esta variabilidad impacta en el área de producción, haciendo que el tiempo de inicio sea también una incertidumbre. Para hacer frente a esta variabilidad en la simulación, se realizó un análisis inferencial para determinar la distribución de probabilidad que representan los tiempos de carga y descarga. La Figura 1 muestra un mapa de la estructura metodológica.

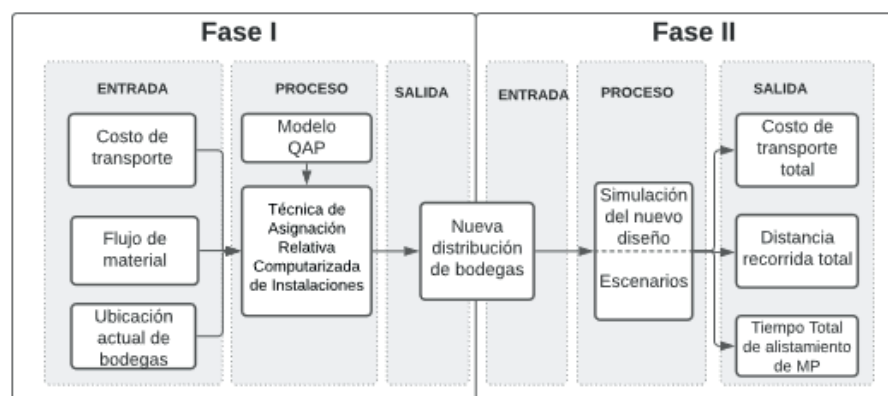


Figura 1. Fases de la metodología
Fuente: elaboración propia.

3.1. Fase 1: problema de la asignación cuadrática

El Problema de la Asignación Cuadrática fue introducido originalmente por Koopmans y Beckmann (1957), que intentaban modelar un problema de localización de instalaciones. Desde entonces, ha sido uno de los temas más estudiados en toda la optimización combinatoria. Muchos científicos han utilizado el QAP para modelar múltiples problemas de optimización.

Se presenta la formulación propuesta por Koopmans y Beckmann del QAP. Dado un conjunto de instalaciones y ubicaciones, junto con los flujos entre instalaciones y las distancias entre ubicaciones, el objetivo del problema de asignación cuadrática es asignar cada instalación a una ubicación, de tal manera que se minimice el costo total (Ver Ecuación 1). La manera más común de plantear el problema de forma combinatoria matemáticamente es esta:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n F_{ij} D_{p(i)p(j)} \quad (1)$$

Donde F y D son las matrices de flujos y distancias de tamaño $n \times n$, cuyos índices i, j , en la matriz representan el flujo entre las entidades de i a j y, a su vez, los mismos índices i, j para la matriz de distancias representan las distancias entre las localidades i y j . El vector p es una permutación de números $\{1, 2, \dots, n\}$ siendo $p(j)$ la localización, donde la entidad j es asignada. Las matrices de flujo F_{ij} y las distancias D_{kl} si son simétricas, cumplen que $F_{ij} = F_{ji}$ y $D_{kl} = D_{lk}$, además $F_{ij} = 0$ y $D_{kl} = 0$, para $i = j$, entonces podemos escribir las instancias de datos en una sola matriz que compacte F y D .

A continuación, se presenta la formulación equivalente al QAP como un programa entero cuadrático 0-1. Esta formulación fue utilizada originalmente por Koopmans y Beckmann (1957), y se basa en la relación uno a uno entre las permutaciones $p \in S_n$ donde S_n es el conjunto de permutaciones. Sea $X = [x_{ij}]$ una matriz $n \times n$. Entonces X se llama matriz de permutación si cumple las siguientes condiciones (Ver Ecuaciones 2 y 3):

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, n; \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n; \quad (3)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}, i, j = 1, \dots, n.$$

Si se cumplen, entonces QAP (F, D) puede formularse de la siguiente manera (Ver Ecuación 4).

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n F_{ij} D_{kl} X_{ik} X_{jl} \quad (4)$$

Sujeto a las Ecuaciones 5 y 6:

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, n; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n; \quad (6)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}, i, j = 1, \dots, n.$$

Para resolver problemas QAP, existen métodos exactos o aproximados. Las estrategias más usadas de métodos exactos suelen ser el Branch and Bound, Respecto a los métodos aproximados, el factor tiempo ha sido clave para desarrollar métodos heurísticos aplicables al problema QAP. Estos procedimientos, aunque no proporcionan una solución óptima, pueden producir buenas respuestas dentro de los límites razonables. El descubrimiento de nuevas heurísticas que proporcionen buenas respuestas con rapidez es algo muy buscado. Según Zaied y Shawky (2014), las heurísticas para abordar el QAP se dividen en cinco categorías básicas:

- Métodos de construcción.
- Métodos de enumeración limitados.
- Métodos de mejora.
- Técnicas de recocido simulado.
- Algoritmos genéticos.

Los métodos de construcción crean permutaciones subóptimas, empezando con una permutación parcial, que inicialmente está vacía. La permutación se expande mediante asignaciones repetitivas basadas en el criterio de selección de conjuntos, hasta completar la permutación. Una de las heurísticas más utilizadas es la Técnica de Asignación Relativa Computarizada de Instalaciones o CRAFT, que se emplea para la disposición de instalaciones, y fue introducida por primera vez por Armour y Buffa (1994) en 1963.

Método CRAFT

CRAFT es la abreviatura de *Computerized Relative Allocation of Facilities Technique*, y es presentada por Armour y Buffa (1994). Este algoritmo calcula la distancia entre los centros de cada instalación y determina el coste de la distribución inicial. El producto del flujo y la distancia entre instalaciones da el coste del trazado inicial. En cada iteración, se selecciona el intercambio que conduce a la mayor reducción de costes y continúa hasta que no se pueda mejorar. Los pares de instalaciones para el intercambio por pares se consideran solo si tienen la misma superficie o son adyacentes. Esta es la limitación del algoritmo CRAFT (Sanli; Eldemir, 2009). El costo de transporte se puede definir como lo que cuesta mover una carga unitaria del departamento i al departamento j , por la distancia entre los departamentos i y j . Este costo total se puede visualizar mejor en la Ecuación 7 (Armour; Buffa, 1994):

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Y_{ij} L_{ij} \quad (7)$$

Donde: n = cantidad de departamentos, Y_{ij} = costo de mover una carga unitaria del departamento i al j , L_{ij} = distancia que separa los departamentos i y j , que están dadas por la métrica rectilínea. U_{ij} = costo de mover una unidad de un departamento i a j , V_{ij} = número de unidades a mover del departamento i a j . De manera que $Y_{ij} = U_{ij} * V_{ij}$ es el costo del flujo de i a j . El método CRAFT parte de los siguientes supuestos:

- Los costos de transporte son independientes de la utilización del equipo.
- Los costos de transporte son directamente proporcionales a la distancia y .
- No hay relaciones o costos negativos.
- Todos los flujos comienzan y terminan en centroides de departamentos.

Caracterización del caso de estudio

La metodología se validó en una compañía de la región, dedicada a la producción y comercialización de licores. Su portafolio actual es de 24 ítems, sus procesos principales son almacenamiento de materia prima, envasado de licor, y almacenamiento y distribución de producto terminado. Las bodegas de materias primas son 6, y tienen la capacidad de almacenar 20 días de producción, la línea de llenado tiene una capacidad de producción de 30.000 botellas diarias, y las bodegas de producto terminado pueden almacenar 340 estibas de 1.152 botellas.

La planta tiene una infraestructura construida de 19.000 m² y cuenta con 2 montacargas para mover material dentro de las instalaciones. Para cumplir con el plan de producción diaria, todos los días un montacarga debe transportar las materias primas desde las bodegas hasta el área de envasado. La línea de envasado se inicia una vez se hayan alistado todas las materias primas necesarias. Del departamento de envasado salen cajas empacadas que, según la referencia, pueden tener entre 6 a 24 unidades.

El flujo de producción depende de la velocidad en que se realice el alistamiento de materias primas, y seguidamente el retiro del producto terminado. Por la tanto, adoptar un nuevo diseño de planta que permita reducir las distancias recorridas y los tiempos de transporte de materiales, puede aumentar la tasa de producción y minimizar el costo del flujo del material. La información de los flujos del proceso se recopila en la Figura 2.

$$Centroide = \left(\frac{x_j + x_l}{2}, \frac{y_j + y_l}{2} \right) \quad (8)$$

Teniendo el centroide de cada localización, se calcula la distancia rectilínea entre los centroides (Figura 4), a través de la Ecuación 9 (Manhattan) (Sherali *et al.*, 2003).

$$d_{jl} \left((x_j, y_j), (x_l, y_l) \right) = |x_j - x_l| + |y_j - y_l| \quad (9)$$

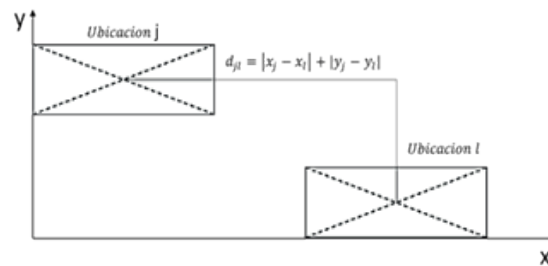


Figura 4. Cálculo de la distancia entre las localizaciones *j* y *l*

Fuente: elaboración propia.

Para graficar departamentos en las localizaciones, se les asigna una letra que tiene como objetivo bordear todo su perímetro, así se puede identificar cuáles fueron las nuevas ubicaciones de los departamentos. En la Tabla 1 se detalla más información.

Tabla 1. Codificación de los departamentos

Departamento	Código	Significado	Descripción
A	"E"	Envasado de li-cor	Este departamento es la zona de producción donde se hace el envasado
B	"P"	Producto termi-nado 1	En este departamento se almacena producto terminado de todas las referencias
C	"p"	Producto termi-nado 2	En este departamento se almacena producto terminado de todas las referencias
D	"T"	Tapas	En este departamento se almacenan las tapas que son materia prima
E	"B"	Botellas 1	En este departamento se almacenan botellas de todas las referencias
F	"b"	Botellas 2	En este departamento se almacenan botellas de todas las referencias
G	"C"	Cartón	En este departamento se almacenan láminas de cartón, que son mate-ria prima para embalar los envases

Fuente: elaboración propia.

3.2. Fase 2. Simulación y formulación de escenarios

El propósito del modelo de simulación es validar el comportamiento de la nueva distribución de los departamentos, teniendo en cuenta la aleatoriedad de los tiempos de carga y descarga de los montacargas, para saber cuál será el tiempo que tardaran en aprovisionar la materia prima. La metodología adoptada para evaluar los resultados de distribución en planta se basó en la simulación de eventos discretos, la estructura metodológica se muestra en la Figura 5.

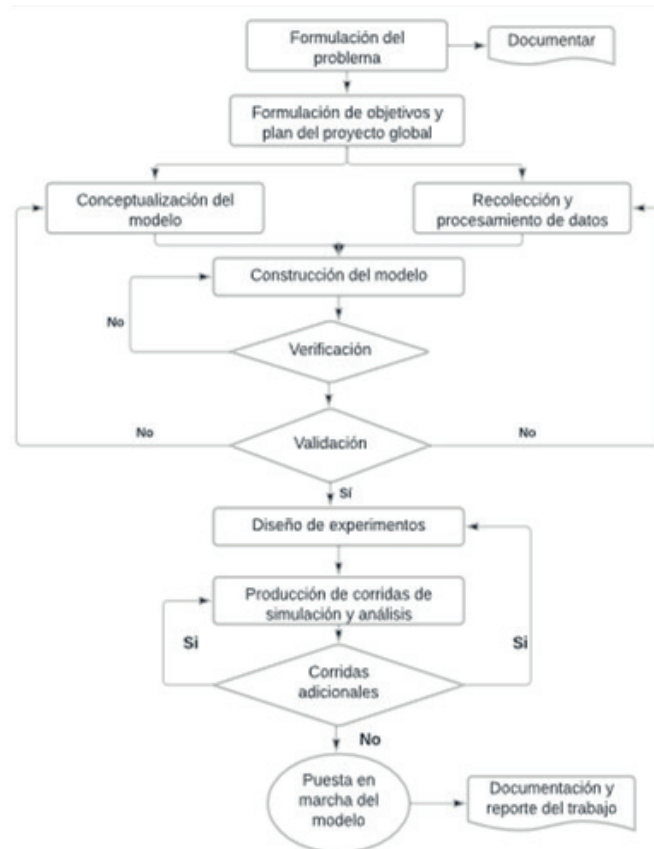


Figura 5. Metodología de simulación
Fuente: Simón (2016).

Simulación discreta

La simulación es el proceso de probar un sistema real en un entorno digital (Xu, 2020). Los diseñadores de planta suelen tener dos opciones: cambiar físicamente la disposición de una instalación existente y evaluar los resultados o simular la nueva distribución y evaluar los resultados antes de realizar cambios (Ekren; Heragu, 2011). Para este estudio, la simulación se convierte en una herramienta importante para evaluar la nueva distribución resultante del método CRAFT.

Análisis de tiempos de carga y descarga de los montacargas

Para el flujo de materiales, la empresa dispone de dos montacargas que mueven material en palletes entre los departamentos. Estos viajan a una velocidad máxima de 5 km/h. Una situación particular que se observó durante la investigación es que los tiempos de carga y descarga de los pallets son muy variados, y que, aunque

son cortos, pueden influir en los resultados. Debido a esto, se hizo una toma de tiempos durante la carga y descarga de los montacargas, para simular dicha variación mediante una distribución de probabilidad que arroje datos aleatorios dentro de los parámetros reales de operación.

Para analizar los datos se utiliza el software ExpertFit versión 8.01, que es un módulo de FlexSim utilizado específicamente para encontrar una distribución estadística de un conjunto de datos. En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos del proceso de cargue.

A. Distribuciones de probabilidad que se ajustan a los tiempos de cargue			
Model	Relative Score	Parameters	
1 - Discrete Uniform	83.33	Lower endpoint	40
		Upper endpoint	58
2 - Poisson	75.00	Lambda	49.87500
3 - Binomial	66.67	Probability	0.41912
		Trial	119
B. Distribuciones de probabilidad que se ajustan a los tiempos de cargue			
Model	Relative Score	Parameters	
1 - Log-Logistic(E)	85.16	Location	15.42405
		Scale	13.21297
		Shape	5.28269
2 - Pearson Type VI(E)	83.59	Location	9.23110
		Scale	11.11602
		Shape #1	54.25442
		Shape #2	30.99991
3 - Inverse Gaussian(E)	78.91	Location	12.25482
		Scale	17.07851
		Shape	226.58475

Figura 6. Distribuciones de probabilidad resultantes del análisis inferencial

Fuente: elaboración propia.

El análisis se hace para que el modelo de simulación recree esos comportamientos estocásticos que se presentan en el desarrollo de las operaciones reales de la empresa, los resultados arrojan que la distribución que mejor se ajusta para los tiempos de carga es *Discrete Uniform* con un puntaje de relatividad del 83,33 %, y para los tiempos de descargue la distribución de mejor ajuste es la *Log-Logistic* con un puntaje de relatividad del 85,16 %.

Escenarios de simulación

Para entender cuál es la variación entre la distribución actual y la distribución resultante de la Fase 1, se modelan 2 escenarios. En el escenario 1 se simula el comportamiento como actualmente están distribuidos los departamentos y en el escenario 2 se recrea la distribución resultante del método CRAFT. La comparación se hace mediante los indicadores de desempeño definidos en la siguiente sección.

Definición de indicadores de desempeño para la fase de la simulación

El sistema de indicadores de una empresa tiene como objetivo ayudar a la gestión y el control de diversos aspectos relacionados con la eficiencia operativa (Flessas *et al.*, 2015). La literatura destaca la importancia de 4 indicadores: costo total de transporte, distancias recorridas, tiempos de alistamiento de materias primas y porcentaje de ocupación de los montacargas.

4. Resultados

4.1. Resultados Fase 1. Modelación

El método CRAFT se ejecutó en el software WINQSB 2.0, este es un programa dividido en varios módulos, orientado al análisis y resolución de modelos matemáticos y problemas administrativos o de producción. En la Figura 7 se muestra la distribución actual de los siete departamentos, estos son representados de forma rectangular, con medidas a escala. Como resultado, en el escenario inicial se tuvo un costo por flujo de material de US \$488,43. En la Figura 7, se muestra la asignación de los departamentos a las localizaciones, sugerida por el método CRAFT. Al comparar los resultados finales con la distribución inicial, los departamentos A, B y C conservan su localización, mientras que los departamentos D, E, F y G tienen una nueva posición. Con esta distribución final se tiene un costo mínimo de transporte interno de US \$ 436,10, lo que significa una reducción de costos del 12,08 %.

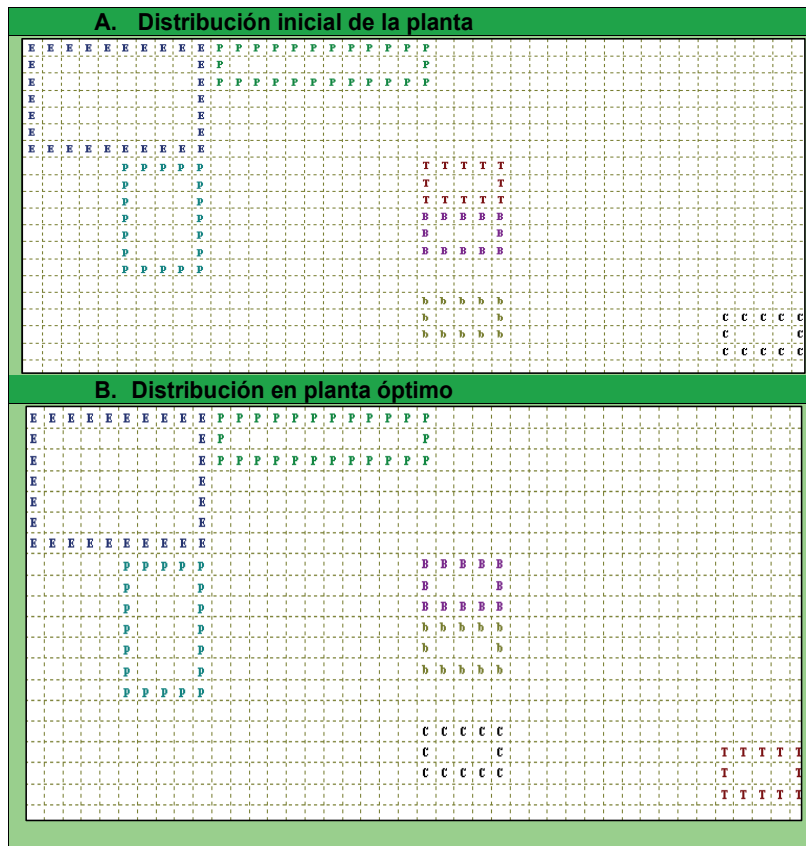


Figura 7. Resultados del método CRAFT

Fuente: elaboración propia.

4.2. Resultados Fase 2. Modelo de simulación

Los resultados del modelo de simulación se presentan en la Tabla 2, la cual describe el comportamiento de la distribución actual frente a la que se obtiene por el método CRAFT. A diferencia de los resultados obtenidos por el método CRAFT, con la simulación fue posible evaluar otros indicadores, tales como la distancia entre departamentos, de acuerdo con las trayectorias de las carreteras reales, dado que estas no están organizadas de manera rectilínea, sino que presentan ciertas curvas, debido a la forma en que está organizada la infraestructura. También fue posible determinar el tiempo que los montacargas tardan en alistar la materia prima, tomando la aleatoriedad de los tiempos de carga y descarga. Por último, se pudo conocer cómo eran las cargas operacionales de los montacargas.

Tabla 2. Resultados de los escenarios generados por la simulación

Escenarios	Distancia total recorrida (metros)	Costo total de transporte (US)	Tiempo de alistamiento de MP. (Min)	% de Ocupación
1	12.899	561,16	130	69,2 %
2	12.105	486,98	124,43	70,3 %
Comparación entre escenario 1 y 2	-6,16 %	-13,22 %	-4,28 %	+1,59 %

Fuente. elaboración propia.

Los resultados de la evaluación realizada en la simulación muestran que, al implementar la nueva distribución sugerida por el método CRAFT, se pueden reducir las distancias recorridas entre los departamentos en un 6,16 %, hecho que se traduce en una reducción del 13,22 % sobre los costes de transporte, y en una reducción del 4,28 % sobre los tiempos de alistamiento de la materia prima. También se incrementa la carga operativa de los montacargas en un 1,59 %, haciéndola más eficiente.

Al comparar los costos resultantes del método CRAFT, que son US \$ 488,43 para el escenario actual y US \$ 436,10 para la nueva distribución, con los costos resultantes del modelo de simulación, que son US \$ 561,16 y US \$ 486,98 para los escenarios actual y propuesto, se puede observar que los costos del modelo de simulación son mayores en ambos casos. Este comportamiento se debe a que en el método CRAFT, al tomar las distancias rectilíneas, son menores a las distancias reales, dado que en la infraestructura de la empresa existen algunas curvas que hacen que la distancia se extienda, mientras que en la simulación se diseñó la trayectoria de las vías, haciendo que los costos sean mayores. Por lo tanto, los resultados de la simulación serían los más cercanos a la realidad, así como los más fiables para la toma de decisiones.

5. Conclusiones

En este artículo se consideró el FLP formulado como un QAP, se propuso el método constructivo CRAFT como alternativa de solución, que, si bien tiene limitaciones, reunió los requisitos de solución para abordar el caso de estudio. A partir del análisis del sistema de producción de una empresa de licores, se abordó un problema de distribución en planta y se evaluó mediante simulación de eventos discretos. El estudio evidenció la existencia de alternativas de solución para la empresa, que, aunque no cubren todos los problemas, constituyen un paso importante para la mejora continua, la competitividad y la productividad.

El estudio de FLP permitió determinar un mejor ajuste respecto al almacenamiento de materias primas, consiguiendo que la empresa pueda optimizar recursos por transporte interno y minimizar los tiempos de aprovisionamiento de materias primas y distancias recorridas de los montacargas. Se demuestra así que es posible conseguir mejoras de los sistemas productivos con pocas inversiones, puesto que, si la empresa decide implementar la propuesta, únicamente debe hacer cambios respecto a la ubicación de materias primas y ajustar su plan de requerimiento de acuerdo con la capacidad de almacenamiento de las bodegas y los pronósticos de la demanda, temas que se pueden abordar con una planeación, compromiso y ejecución adecuadas.

La simulación fue una herramienta determinante en el estudio, porque permitió validar el comportamiento de la propuesta de distribución generada por el método CRAFT, sin tener que hacer ningún tipo de modificación en la planta real. Se demostró cuantitativamente cuántos metros, costos y tiempos podría ahorrarse la empresa en comparación con la distribución actual.

La simulación le permite a la empresa reducir los riesgos de tomar malas decisiones y, aunque no arroja resultados exactos, es uno de los métodos que más se aproxima a la realidad, y que genera datos confiables y contundentes para la toma de decisiones.

Referencias

- Achary, Thimershen; Pillay, Shivani; Pillai, Sarah; Mqadi, Malusi; Genders, Emma; Ezugwu, Absalom (2021). A performance study of meta-heuristic approaches for quadratic assignment problem. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 33(17), 1-29.
<https://doi.org/10.1002/cpe.6321>
- Anjos, Miguel; Vieira, Manuel (2017). Mathematical optimization approaches for facility layout problems: The state-of-the-art and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 261(1), 1-16.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.049>
- Armour, Gordon; Buffa, Elwood (1994). Heuristic algorithm and simulation approach to relative location of facilities. *American Society of Mechanical Engineers, Material Handling Division, MHD*, 9(2), 101-116.
<https://doi.org/10.1287/mnsc.9.2.294>
- Benjaafar, Saifallah; Sheikhzadeh, Mehdi (2000). Design of flexible plant layouts. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 32, 309-322.
<https://doi.org/10.1023/A:1007691303186>
- Chiang, Wen-Chyung; Chiang, Chi (2018). Intelligent local search strategies for solving facility layout problems with the quadratic assignment problem formulation. *European Journal of Operational Research*, 106(2-3), 457-488.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00285-3](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00285-3)
- Cubukcuoglu, Cemre; Nourian, Pirouz; Tasgetiren, Fatih; Sariyildiz, Sevil; Azadi, Shervin (2021). Hospital layout design renovation as a Quadratic Assignment Problem with geodesic distances. *Journal of Building Engineering*, 44, 102952.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102952>
- Davis-Sramek, Beth; Mentzer, John; Stank, Theodore (2008). Creating consumer durable retailer customer loyalty through order fulfillment service operations. *Journal of Operations Management*, 26(6), 781-797.
<https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.07.001>
- Ekren, Banu; Heragu, Sunderesh (2011). Simulation based performance analysis of an autonomous vehicle storage and retrieval system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(7), 1640-1650.
<https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.02.008>
- Flessas, Milena; Rizzardi, Vinicius; Tortorella, Guilherme; Fettermann, Diego; Marodin, Giuliano (2015). Layout performance indicators and systematic planning. *British Food Journal*, 117(8), 2098-2111.
<https://doi.org/10.1108/BFJ-01-2015-0012>
- Forghani, Kamran; Khamseh, Alireza; Mohammadi, Mohammad (2012). Integrated quadratic assignment and continuous facility layout problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 3(5), 787-806.
<https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2012.07.001>
- González-Longoria, Héctor (2016). La heurística LDMP: Una metodología híbrida basada en el problema de transporte para el diseño óptimo de la distribución de planta. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(4), 463-478.
<https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.11.006>

- Halawa, Faroug; Chalil, Sreenath; Gittler, Alice; Khasawneh, Mohammad (2020). Advancing evidence-based healthcare facility design: a systematic literature review. *Health Care Management Science*, 23(3), 453-480. <https://doi.org/10.1007/s10729-020-09506-4>
- Halawa, Farouq; Chalil, Sreenath; Khasawneh, Mohammad (2021). Integrated framework of process mining and simulation-optimization for pod structured clinical layout design. *Expert Systems with Applications*, 185, 115696. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115696>
- Halim, Felecia; Wulandari, Dian (2018). Library facility layout design for digital native generation. En *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (pp. 846-849). Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2017.8290011>
- Hameed, Asaad; Mutar, Modhi; Alrikabi, Haiffa; Ahmed, Zakir; Abdul-Razaq, Abeer; Nasser, Huda (2021). A hybrid method integrating a discrete differential evolution algorithm with tabu search algorithm for the quadratic assignment problem: A new approach for locating hospital departments. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 6653056. <https://doi.org/10.1155/2021/6653056>
- Hunagund, Irappa; Pillai, Madhusudanan; Kempaiah, Ujjaini (2018). A simulated annealing algorithm for unequal area dynamic facility layout problems with flexible bay structure. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(3), 307-330. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.8.004>
- Izadinia, Niloufar; Eshghi, Kouros (2016). A robust mathematical model and ACO solution for multi-floor discrete layout problem with uncertain locations and demands. *Computers and Industrial Engineering*, 96, 237-248. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.02.026>
- Koopmans, Tjalling; Beckmann, Martin (1957). Assignment Problems and the Location of Economic. *Econometrica*, 25(1), 53-76.
- Kusiak, Andrew; Heragu, Sunderesh (1987). The facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 29(3), 229-251. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(87\)90238-4](https://doi.org/10.1016/0377-2217(87)90238-4)
- Lakehal, Soumaya; Aitzai, Abdelhakim; Ghedjati, Fatima (2021). Parallel hybrid BBO-TS algorithm for QAP-formulation of FLP. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(11-12), 3189-3209. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07000-x>
- Leyva, Máximo; Mauricio, David; Salas, Julio (2016). Una taxonomía del problema de distribución de planta por procesos y sus métodos de solución. *Industrial Data*, 16(2), 132-143. <https://doi.org/10.15381/idata.v16i2.11930>
- Liu, Hanwen; Liu, Xiaobing; Lin, Lin; Islam, Sardar; Xu, Yuqing (2020). A study of the layout planning of plant facility based on the timed Petri net and systematic layout planning. *PLoS ONE*, 15(9), e0239685. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239685>

- Loiola, Eliane; de Abreu, Nair; Boaventura-Netto, Paulo; Hahn, Peter; Querido, Tania (2007). A survey for the quadratic assignment problem. *European Journal of Operational Research*, 176(2), 657-690.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.09.032>
- Matai, Rajesh; Sharma, Renduchintala; Singh, Vinay; Singh, Surya; Kaushik, Trinika (2021). A New Discrete Bi-objective Formulation of Unequal Area Facility Layout Problem. *2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* (pp. 778-782). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<https://doi.org/10.1109/IEEM50564.2021.9673028>
- Montaña, Juan; Mendoza, Jaime; Segura, Juan (2018). Desarrollo e Implementación de la Herramienta V.S.M. (Value Stream Map) Usando "Idef0", para la División Producción de la Industria Licorera del Cauca. *KnE Engineering*, 3(1), 843-852.
<https://doi.org/10.18502/keg.v3i1.1505>
- Paredes, Andrés; Pelaez, Kelly; Chud, Vivian; Payan, Jorge; Alarcon, Diana (2016). Rediseño de una planta productora de lácteos mediante la utilización de las metodologías SLP, CRAFT y QAP. *Scientia et Technica*, 21(4), 318-327.
<https://doi.org/10.22517/23447214.12571>
- Paz-Orozco, Helmer; Segura-Dorado, Jhon (2021). Propuesta de un diseño de distribución de un centro logístico frutícola para la zona franca agroindustrial en la Región Patía: caso Colombia. *Publicaciones e Investigación*, 15(1), 1-12.
<https://doi.org/10.22490/25394088.5416>
- Ramírez, Eliana; Chud, Vivian; Orejuela, Juan (2019). Propuesta metodológica multicriterio para la distribución semicontinua de plantas. *Suma de Negocios*, 10(23), 132-145.
<https://doi.org/10.14349/sumneg/2019.v10.n23.a6>
- Ripon, Kazi; Glette, Kyrre; Khan, Kashif; Hovin, Mats; Torresen, Jim (2013). Adaptive variable neighborhood search for solving multi-objective facility layout problems with unequal area facilities. *Swarm and Evolutionary Computation*, 8, 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.swevo.2012.07.003>
- Samanta, Suman; Philip, Deepu; Chakraborty, Shankar (2018). Bi-objective dependent location quadratic assignment problem: Formulation and solution using a modified artificial bee colony algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, 121, 8-26.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.018>
- Sanli, Hatice; Eldemir, Fahrettin (2009). *Spiral facility Layout Generation and Improvement Algorithm*. En *11th IMHRC Proceedings*. Digital Southern University.
https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/pmhr_2010/6
- Sembiring, Anita; Sitanggang, Delima; Budiman, Irwan; Aloina, Grace (2019). Redesign layout of production floor facilities using Algorithm CRAFT. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 505(1), 012016.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/505/1/012016>
- Simón, Isaías (2016). *Un primer paso a la simulación con FlexSim*. FlexSim Iberia.

- Sherali, HD.; Fraticelli, BM.; Meller, RD. (2003). Formulaciones modelo mejoradas para un diseño óptimo de las instalaciones. *Investigación de Operaciones*, 51(4), 629-644.
- Tarigan, Ukurta; Ishak, Aulia; Simanjuntak, Lia; Rizkya, Indah; Putri, Kay; Tarigan, Ukur (2020). Facility Layout Redesign with Static Facility Layout Planning (SFLP) and Dynamic Facility Layout Planning (DFLP) at Convection and Computer Embroidery Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1003(1), 012033.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1003/1/012033>
- Xu, Xiaorong (2020). SLP-based technical plant layout planning and simulation analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 772(1), 012020.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/772/1/012020>
- Zaied, Abdel; Shawky, Laila (2014). A survey of the quadratic assignment problem. *International Journal of Computer Applications*, 101(6), 28-36.
<https://doi.org/10.5120/17693-8662>
- Zhao, Yifei; Wallace, Stein (2014). Integrated Facility Layout Design and Flow Assignment Problem Under Uncertainty. *Inform Journal on Computing*, 26(4), 798-808.
<https://doi.org/10.1287/ijoc.2014.0599>