

Métodos cuantitativos utilizados en el diseño de la gestión de almacenes y centros de distribución

Quantitative methods used in the design of warehouse and distribution center

Rodrigo A. Gómez M., Ing.¹, Alexander A. Correa E., Ph.D.².

1. Corporación Universitaria Lasallista, Colombia

2. Escuela de Ingeniería de la Organización, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín

Recibido para revisión 07 de septiembre de 2010, aceptado 28 de octubre de 2010, versión final 19 de noviembre de 2010

Abstract—This paper seeks to review and describe the state of the art of using quantitative methods applied to the design of the management of warehouses and distribution centers, with the purpose of identifying research opportunities and establish approaches to modeling. To achieve the objective, methods are covered, such as analytical methods, heuristics, metaheuristics, discrete simulation, experimental design, among others. Finally, we reviewed the state of the art, the research identified the opportunity of using discrete simulation and experimental design and methods to support the design of warehouse management, since the former is capable of and to represent, analyze and evaluate policies, considering operations and resources under uncertainty. For its part, the experimental design, including planning and execution of statistical experiments for determining factors that impact the performance of the logistics process, and eliminates the need for empirical experiment for reliable analysis.

Keywords— Discrete Simulation, quantitative methods, warehouse management, Design of Experiments.

Resumen— El presente artículo se revisa y describe el estado del arte del uso de métodos cuantitativos aplicados al diseño de la gestión de almacenes y centros de distribución, con el fin, de identificar oportunidades de investigación y establecer enfoques de modelamiento. Para alcanzar, el objetivo propuesto, se cubren métodos, tales como: métodos analíticos, heurísticos, metaheurísticos, simulación discreta, diseño experimental, entre otros. Finalmente, revisado el estado del arte, se identificó la oportunidad de utilizar la simulación discreta y el diseño experimental como métodos para apoyar el diseño de la gestión de almacenes, ya que el primero tiene la capacidad de representar, analizar y evaluar políticas, operaciones y recursos considerando condiciones de incertidumbre. Por su parte, el diseño experimental, incluye planeación y ejecución de experimentos

estadísticos que permiten definir factores que impactan en el desempeño de este proceso logístico, y elimina la necesidad de experimentación empírica para obtener análisis más confiables.

Palabras Clave— Simulación discreta, métodos cuantitativos, gestión de almacenes, diseño de experimentos

I. INTRODUCTION

En la última década la gestión de almacenes ha cobrado importancia en el ámbito empresarial, por su impacto en la productividad y eficiencia en las compañías, tanto en su cadena de suministro como su sistema logístico, ya que no sólo se encarga de regular la oferta y demanda de inventarios, sino que también afecta la satisfacción de las necesidades de los clientes y los costos de operación.

Debido a la importancia de la gestión de almacenes, el presente artículo, busca revisar y describir el estado del arte del uso de métodos cuantitativos aplicados al diseño de la gestión de almacenes y centros de distribución, con el fin, de identificar oportunidades de investigación y establecer enfoques de modelamiento. Por lo cual, se convierte en una información base para investigadores y profesionales interesados en el tema.

En cuanto a la metodología utilizada, se considera la búsqueda, recolección y análisis de artículos científicos relacionados con el diseño de la gestión de almacenes, las cuales, se encuentran en libros y bases de datos electrónicas, tales como: Science Direct, Emerald, Taylor and Francis, Scholar, entre otras. Adicionalmente, para soportar la elaboración del artículo, se utilizan los resultados de la propuesta de tesis de maestría: Desarrollo de modelo para apoyar el diseño o mejoramiento de

las operaciones y recursos de la gestión de almacenes basado en simulación discreta y diseño experimental (Gómez, 2010), para divulgar los resultados del tema en esta publicación.

Finalmente, la estructura del artículo, se divide en cuatro partes, tales como: introducción; cadena de suministro, SCM, logística y gestión de almacenes; revisión de antecedentes y estado del arte de la utilización de métodos cuantitativos en el diseño de la gestión de almacenes; enfoque de modelamiento seleccionado, y las conclusiones del artículo.

II. CADENA DE SUMINISTRO, SCM, LOGÍSTICA Y GESTIÓN DE ALMACENES

Los conceptos de cadena de suministro, SCM (Supply Chain Management) y logística han adquirido importancia en el medio empresarial y académico por su aporte a la eficiencia, productividad y contribución de la satisfacción de las necesidades de los clientes.

La cadena de suministro puede ser definida como una red de instalaciones y procesos, que permiten la transformación de materias primas en productos para satisfacer las necesidades de los clientes [1]. Por su parte, la SCM, consiste en la coordinación e integración de las actividades de la cadena de suministro, con el fin de mejorar sus relaciones, y que esta alcance una ventaja competitiva sustentable [1]. En cuanto al componente de logística, Coyle, Langley y Bardi [2], la describe como parte de la cadena de suministro encargada de la planeación, implementación y control de los flujos de información, productos y dinero desde el punto de origen hasta los de consumo, incluyendo la logística inversa. Finalmente, se puede indicar, que la gestión de almacenes, es un proceso logístico que contribuye a la gestión de flujos de productos e

información que permiten la satisfacción de los clientes en la cadena de suministro.

A continuación, se presenta gráficamente la relación entre los conceptos de cadena de suministro, SCM y logística, con el fin, de mejorar su comprensión y rol de cada uno de los componentes (ver figura.1).

De la Figura 1 y las definiciones presentadas, se identifica, que la SCM y la logística, permiten la adecuada gestión y operación de la cadena de suministro, por tal motivo, deben ser diseñadas y coordinadas adecuadamente, debido a que facilitan los flujos de información, productos y dinero que permite satisfacer las necesidades de los consumidores y operar eficazmente, incluyendo la gestión de almacenes.

III. GESTIÓN DE ALMACENES: GENERALIDADES, ENFOQUES PARA SU DISEÑO

Este numeral tiene como objetivo revisar, describir y analizar la gestión de almacenes desde la perspectiva de sus generalidades y enfoques para su diseño.

A. Generalidades

La gestión de almacenes es un proceso logístico, que afecta el desempeño y la operación de la cadena de suministro. En cuanto, a su impacto en la SCM, Van der Berg y Zijm [4], describe que esta juega un papel importante, ya que es un medio que permite a las empresas que la integran, gestionar menores niveles de inventarios y efectuar sus actividades en tiempos de respuesta más cortos, intentando mejorar la satisfacción de los clientes y aumentar la eficiencia operacional.

Min [5], indica que la gestión de almacenes, representa una porción significativa de los gastos y costos de una compañía, de allí, la presión de estas en diseñarla, administrarla y controlarla de forma eficiente y productiva. Por su parte, Baker y Halim [6], establecen una posición similar, ya que describen que esta representa el 20% de los costos totales logísticos de la empresa, y es determinante para que se alcance niveles de servicios adecuados.

En cuanto a su definición, se puede indicar que la gestión de almacenes es un proceso logístico, que se compone de diversas operaciones tales como: recepción, almacenamiento, preparación de pedidos y despachos, que permiten gestionar materia prima, productos semielaborados y terminados para satisfacer las necesidades de los diferentes clientes, regular la oferta y demanda de los productos, y contribuir a la reducción de costos en la cadena de suministro [7] [8].

En lo relacionado con sus objetivos estos generalmente, se enfocan en maximizar el servicio al cliente, el uso de los recursos y la eficiencia de las operaciones minimizando costos y riesgos en la gestión de los productos [7],[9]. Aunque existen diferentes tipos de almacenes, los cuales pueden variar, según su uso

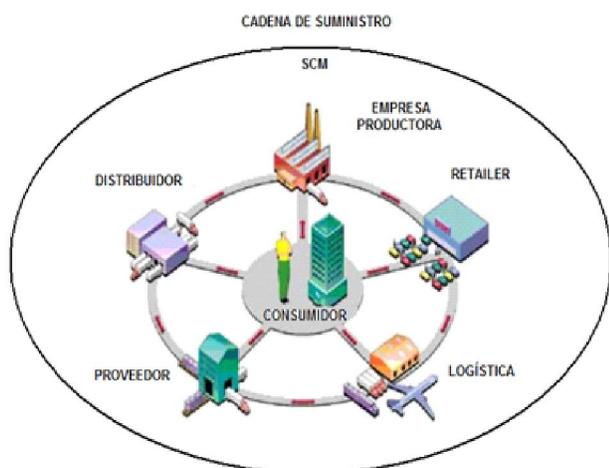


Figura 1. Cadena de suministro y sus componentes.
Adaptado de: Student [3]

operativo y logístico, dichos objetivos son aplicables. A continuación, se representan los tipos de almacenes más usuales en los sistemas logísticos y la cadena de suministro (ver figura.2)

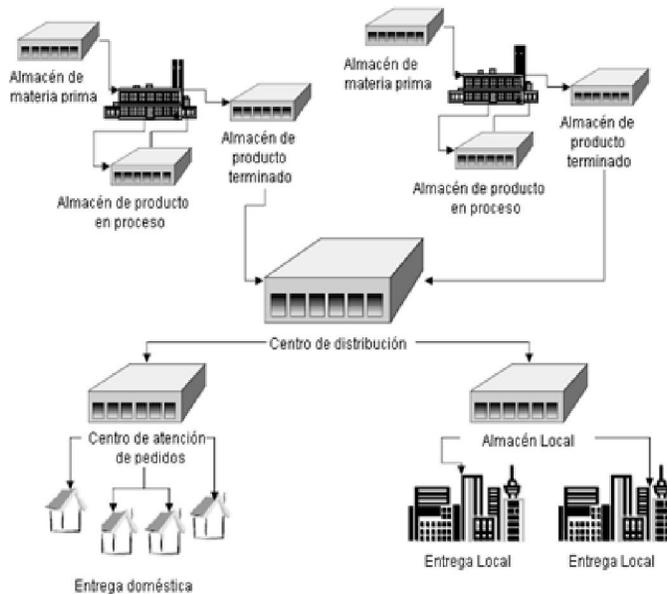


Figura 2. Tipos de almacenes
 Fuente: Tomado de Frazelle[7]

De los tipos de almacenes presentados, se puede indicar que los centros de distribución (CEDI), incluye funciones típicas, tales como, recepción, almacenamiento, preparación de pedidos y despacho, las cuales, generalmente, permiten agilizar y mejorar el sistema de distribución de la empresa para aumentar la eficiencia de la cadena de suministro, reducir los niveles de inventarios, incrementar la satisfacción a las necesidades del cliente y agregar valor a los productos [6].

B. Diseño de la gestión de almacenes, y sus enfoques

Según Van der Berg y Zijm [4], el diseño de la gestión de almacenes es un conjunto de decisiones que toma la organización, las cuales, afectan sus niveles estratégicos, tácticos y operativos, y suelen generar un impacto en el largo plazo enfrentando generalmente alta incertidumbre. Por su parte, Gu, Goetschalckx, y McGinnis [10], describe que dicho diseño, comprende cinco decisiones estratégicas, tales como, desarrollo de su estructura general, tamaño y dimensionamiento, *layout*, selección de equipos y estrategia de operaciones. La configuración de las decisiones descritas sirven como base para la planeación y control de las operaciones de recepción, acomodo, almacenamiento, preparación de pedidos, clasificación y despacho.

Bodner, *et al.* [11], describe que el diseño de la gestión de almacenes, incluye la especificación de sistemas y operaciones, flujos de información, productos, y la relación entre ellos.

A partir de la revisión realizada, se identifican diferentes tipos de enfoques de diseño de gestión de almacenes, los cuales, se

centran principalmente en configurar y coordinar la interacción entre las estrategias, operaciones, *layout* y flujos de información y productos en los niveles estratégicos, tácticos y operativos, intentando de esta manera satisfacer las necesidades de los clientes y contribuir a una cadena de suministro con un desempeño adecuado.

Dentro de los métodos cuantitativos identificados, se encuentran la simulación y métodos analíticos [12],[13], [14]. En el caso específico de la simulación, su preferencia, se debe a sus capacidades de análisis y representación de sistemas bajo condiciones de incertidumbre [14]. Por su parte, los métodos analíticos (investigación de operaciones) facilitan el diseño, por su orientación a la obtención de soluciones óptimas o pseudo-óptimas [14]. De otra parte, se han identificado otras técnicas cuantitativas basadas en estadística como el diseño experimental, que contribuye al aumento de las capacidades para analizar y evaluar alternativas en el diseño de almacenes.

Se debe considerar que la aplicación de los diferentes métodos cuantitativos antes mencionados, puede depender de las necesidades de la empresa y su cadena de suministro, capacidad de inversión, recursos disponibles, nivel de complejidad e información de la gestión de almacenes y competencias del equipo de diseño.

Realizada una contextualización de algunos de los métodos cuantitativos que apoyan el diseño de gestión de almacenes, a continuación, se describen sus generalidades y aplicaciones que pueden orientar su uso. Para alcanzar este objetivo, se realiza una revisión bibliográfica y análisis de libros y artículos científicos incluidos en bases de datos como Science Direct, Springer, Taylor and Francis, Scholar, Google Books, entre otros.

VI. REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE DE LA UTILIZACIÓN DE MÉTODOS CUANTITATIVOS EN EL DISEÑO DE LA GESTIÓN DE ALMACENES

Una vez identificadas algunos métodos cuantitativos, que pueden ser aplicados en el diseño de la gestión de almacenes. A continuación, se revisan algunas de sus definiciones, incluyendo propuestas que conforman los antecedentes y estado del arte del tema. Con el fin de mejorar la identificación de los métodos a presentar, a continuación, estos se representan en la figura 3 .

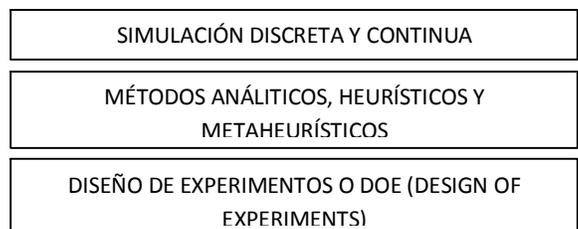


Figura 3. Métodos cuantitativos a revisar en el diseño de la gestión de almacenes

A. Simulación discreta y continua (dinámica de sistemas)

Una de las técnicas más utilizadas en el diseño de procesos es la simulación de sistemas, la cual definida por Deo (2004) como: “Una herramienta poderosa para resolver una amplia variedad de problemas, a través de la representación o imitación del comportamiento del sistema o fenómeno bajo estudio”.

Por su parte Obaidat y Papadimitriou (2003), define que la simulación, se clasifica en dos tipos, i) simulación discreta y ii) simulación continua. La primera, se relaciona con la representación de sistemas que cambian en puntos definidos del tiempo o cuando ocurren eventos, tales como la entrada o salida de un cliente de una tienda o la entrada de un producto en un centro de distribución. En cuanto a la simulación continua, el estado de las variables cambia continuamente en el tiempo, tales como, la velocidad promedio de una banda transportadora, temperatura de un sistema de almacenamiento en frío y demanda de productos.

• Simulación discreta

Según Obaidat y Papadimitriou [15] la simulación discreta es: “la imitación de la operación de un sistema o proceso del mundo real sobre el cual se realizan experimentaciones por medio de un modelo construido bajo medidas y políticas en estudio, con el fin de determinar oportunidades de mejora o definir características de diseño de procesos”. Por su parte, Frazelle [7], indica que esta herramienta permite valorar, analizar y escoger las mejores alternativas de diseño o mejora en la gestión de almacenes, ya que se enfoca en la programación sobre objetos, posee la capacidad de mostrar los modelos operando en conjunto y representa la variabilidad real que existe en los procesos bajo simulación.

Una vez descritos los conceptos y generalidades de la simulación discreta. A continuación, se presentan algunos de los enfoques y aplicaciones en la gestión de almacenes que se han realizado en el ámbito académico, y se consideran en su estado del arte. Esta revisión, hace énfasis en el diseño o mejoramiento de la preparación de pedidos, sistemas de almacenamiento automático AS (*Automatic Storage*)/AR(*Automatic Retrieval*) y diseño de las operaciones de la gestión de almacenes (ver cuadro.1). Se debe resaltar, que el concepto de picking o preparación de pedidos, permite identificar, recuperar y organizar los productos que serán utilizados para atender los requerimientos de los clientes [7].

De las aplicaciones presentadas (ver Cuadro.1), se identificó que la simulación discreta es utilizada en la gestión de almacenes, como una herramienta para representar sus operaciones, evaluar alternativas de diseño y mejora, apoyar la toma de decisiones considerando criterios, tales como, costos, estrategias de operaciones, tiempos de respuesta, utilización de recursos, equipo de manejo de materiales, entre otros. Adicionalmente, se observó, que la mayoría de las aplicaciones, se enfocaban en casos u operaciones particulares en la gestión de almacenes,

Cuadro 1. Aplicaciones de simulación discreta en la gestión de almacenes

Preparación de pedidos o picking	En el diseño de las operaciones en la gestión de almacenes
<ul style="list-style-type: none"> • Cho y Hwang[16] plantean un modelo para la evaluación del desempeño para el diseño de un sistema de <i>picking</i> en el almacén. • Che-Hung y Luan-Yuan [17] desarrolla un procedimiento para determinar las estrategias de <i>picking</i> en un centro de distribución. • Caron, Marchet y Perego [18], elabora un enfoque de simulación y sistema integrado de manufactura en el diseño de planta en un sistema de <i>picking</i> manual. • Chin[19] plantea un modelo que busca evaluar y tomar decisiones sobre el diseño del proceso de preparación de pedidos en la gestión de almacenes soportado en un diseño experimental 2^d. 	<ul style="list-style-type: none"> • Takakuwa [23] realiza una propuesta para la construcción de modelos de simulación para centros de distribución no automatizados • Burnett [24] plantea un modelo de almacenamiento eficiente que considera el diseño, predicción de requerimiento de recursos y salidas de capacidades operacionales la deficiencia identificada es la no consideración de técnicas de experimentación estadísticas como el DOE que brinde confiabilidad en las decisiones. • Macro [25], realiza un modelo genérico para simulación del diseño de la capacidad de almacenamiento y eficiencia de las estanterías basado en el lenguaje Promodel. • Gagliardi [26], desarrolla un modelo de simulación discreta para el mejoramiento de las operaciones de la gestión de almacenes de una gran empresa de pasabocas en los Estados Unidos. • Buil y Piera [27], desarrollan una metodología y un modelo de simulación discreta en ARENA para rediseñar las operaciones de la gestión de almacenes, considerando restricciones de costos, calidad, tiempo de respuesta, entre otros. • Greasley [28], construye un modelo de simulación discreta en 3D para diseñar el área de almacenamiento en las instalaciones de una empresa textil tomando como parámetro la estimación del inventario de producto en proceso
Sistemas AS(<i>Automatic Storage</i>)/AR(<i>Automatic Retrieval</i>)	
<ul style="list-style-type: none"> • Lee, Huang, Goldsman, Xu y Liu[20] elabora un modelo de simulación para determinar las políticas de almacenamiento de reserva para un AS/AR en una Terminal de aviones de carga. • Potr̄c , Lerher , Kramberger y Sraml [21] plantearon un modelo de simulación de múltiples servicios(multi-shuttle) para un sistema AS/AR • Y. H. Lee, Lee y Hur [22] proponen un modelo para diseñar celdas de almacenamiento automatizadas apoyándose en simulación 	

Fuente: Elaboración propia

y no se consideran modelos integrales que cubrieran su diseño como un todo.

• **Simulación continua o con Dinámica de sistemas**

La dinámica de sistemas o simulación dinámica es utilizada cuando el estado de las variables de los procesos o sistemas cambian continuamente en el tiempo sin depender de los estados de inicio-fin de las operaciones [29]. Por su parte, Dyner, Peña y Arango [30], indican que esta técnica, fundamenta su utilización y aplicabilidad, en el entendimiento y representación de procesos de retroalimentación, y en su capacidad de reproducir los comportamientos de los sistemas que interactúan. Adicionalmente, este mismo autor describe que los modelos de dinámica de sistemas: *“contribuyen de manera importante en el estudio de sistemas socio-económicos inestables, cuando en ellos se presentan ciclos de retroalimentación, en los cuales las condiciones de funcionamiento del sistema conllevan a decisiones, que a su vez producen acciones, que pueden causar alteraciones en el sistema y por consiguiente influyen en las decisiones futuras”*.

Por otra parte, Bowersox [31], indica que la dinámica de sistemas desarrolla modelos que apoyan a la administración en el diseño y toma de decisiones sobre sistemas de distribución física (transporte, inventario, operaciones de almacenamiento, movimiento de materiales y órdenes de pedidos), debido a que incorporan ciclos de realimentación de información para medir la dependencia de las acciones actuales sobre la reacción del ambiente u otras decisiones futuras necesarias. Adicionalmente, este autor agrega que la dinámica de sistemas permite una planeación de distribución física sobre el tiempo con suficiente retroalimentación para asegurar que los impactos futuros o consecuencias de una decisión son adecuadamente tratados.

Por los conceptos y artículos revisados de dinámica de sistemas, se puede inferir que esta puede ser utilizada en la gestión de almacenes, cuando se requieran evaluar políticas y estrategias que afectan la operación de sus procesos considerando, información de retroalimentación y acciones que afecten al sistema. Adicionalmente, se debe indicar, que de los artículos científicos analizados, no se identifican propuestas de dinámica de sistemas, que apoyen el diseño de la gestión de almacenes por lo cual, puede considerarse un tema de investigación potencial, por los beneficios y características de este método cuantitativo.

Una vez analizado los conceptos de simulación, se puede concluir que esta es una técnica que permite representar el comportamiento de un sistema, con el fin de experimentar y evaluar alternativas para su diseño y mejora. Adicionalmente, se puede indicar que la simulación puede clasificarse como discreta y continua. La primera, se enfoca en el modelamiento de eventos que ocurren o cambian en periodos determinados en el tiempo o se activan con el comienzo o terminación de actividades, lo cual es aplicable a la gestión de almacenes. Por su parte, la simulación continua o dinámica de sistemas, se

enfoca en la representación de sistemas con variables que no dependen del estado de inicio-fin de operaciones y que varían continuamente en el tiempo, lo cual facilita su aplicación en el análisis de políticas y estrategias basado en la retroalimentación para medir los impactos en las decisiones.

A. Métodos analíticos, heurísticas y metaheurísticos

Una de las herramientas cuantitativas más utilizadas en el diseño de sistemas de manufactura, cadena de suministro y logística, incluyendo la gestión de almacenes, son los métodos analíticos, heurísticos y metaheurísticos. Los primeros, suele ser utilizados por sus capacidades de hallar soluciones óptimas [13]. Por su parte, el segundo y tercero, han cobrado importancia debido a su estructura y capacidad para encontrar buenas soluciones a problemas, aunque no garantice el hallazgo de resultados óptimos.

Debido a la tendencia de su uso y la confusión potencial de usarse en vez de la simulación en el diseño de la gestión de almacenes. A continuación, se revisan algunas de sus definiciones, usos y su relación y diferencia con la simulación discreta.

Los métodos analíticos como la programación lineal y dinámica, son técnicas de la investigación de operaciones basada en programación matemática, que permite la asignación eficiente de recursos a través de la construcción de ecuaciones algebraicas [32]. Generalmente, estas técnicas utilizan restricciones de disponibilidad de recursos y criterios de asignación (optimización de costos o rentabilidad) para identificar alternativas de decisiones óptimas y validas. De otra parte, la desventaja que puede presentar los métodos analíticos es la dificultad para la construcción de los modelos matemáticos que representan la función objetivo del problema.

Los heurísticos o algoritmos heurísticos, pueden ser considerados como métodos que se basan en la experiencia o juicio, que probablemente ofrece soluciones adecuadas a problemas, sin garantizar que se produce la solución matemática óptima como los métodos analíticos [33]. Por su parte, Lourenço [34], indica que un heurístico puede ser clasificado en dos tipos, constructivo (produce una solución simple) y búsqueda local (comenzando desde una solución o varias soluciones aleatorias para moverse iterativamente a soluciones cercanas). En cuanto a su aplicaciones, se relaciona con situaciones que impliquen: a) problemas combinatoriales, tales como: el problema de transporte, b) dificultad en la evaluación de la función objetivo por presencia de valores estocásticos y c) problemas con cambios notables por ítem y situaciones a modelar.

Por su parte, los metaheurísticos, son definidos por Lourenço [34], como una estructura para producir heurísticas, tales como, búsqueda tabú, algoritmos genéticos y simulación recocida, que puede ser aplicados a diseño de procesos logísticos y presentan ventajas respecto a métodos tradicionales de optimización, tales como, a) fácil implementación, b) robustez

del modelo, c) capacidad para resolver problemas NP-hard o combinatoriales. En cuanto a sus usos, se incluyen diseño de sistemas productivos, cadena de suministro, y procesos logísticos tales como, localización de instalaciones, transporte y ruteo de vehículos, manipulación de materiales, preparación de pedidos, servicio al cliente, diseño de producto, logística de producción y operaciones, gestión de almacenes, estrategias de distribución, administración de inventarios, logística inversa, comercio electrónico, etc.

A continuación, se revisan algunos artículos que representan

Cuadro 2. Métodos Analíticos, Heurísticos y Metaheurísticos utilizados en el diseño de la gestión de almacenes.

Chang, Liu, Xin y Liu [35]	Almeder, Preusser y Hart [36]
Plantean la utilización de métodos metaheurísticos como los algoritmos genéticos para maximizar la eficiencia de la operación de preparación de pedidos en una gestión de almacenes automatizada, la cual, se mide a través de la reducción del tiempo promedio de esta operación.	Propone utilizar conjuntamente la simulación métodos analíticos como la programación lineal (que puede ser reemplazado con metaheurístico, si el problema de optimización es complejo de formular) y simulación discreta para analizar y apoyar las actividades de diseño de las operaciones de la gestión de almacenes.
El modelo propuesto tiene la capacidad de considerar restricciones de la operación de preparación de pedidos, y ofrecer un enfoque de modelamiento efectivo, ágil y eficiente orientado a la optimización de un tiempo de operación.	Además, los autores describen que los modelos de simulación suelen incluir elementos no lineales y estocásticos, mientras los de optimización suelen consideran variables determinísticos, que se enfocan a minimizar o maximizar una función objetivo en la gestión de almacenes
Baker y Canessa [13]	Chiang, Russell, Xu y Zepeda [37]
Describen el uso de métodos analíticos y simulación para apoyar el diseño de gestión de almacenes, en especial, para la selección del tipo y cantidad de equipos de manejo de materiales, determinación de la unidad de carga, evaluación del layout o configuración del almacén.	Plantea un modelo combinado de simulación discreta y metaheurísticos para resolver el problema de integración de la producción y distribución, que incluye la gestión de almacenes en la administración de la cadena de suministro de una empresa de periódicos. La combinación de las herramientas permite aprovechar los beneficios estocásticos y determinísticos de los métodos antes descritos.
En cuanto, a las desventajas del uso de los métodos analíticos, este autor describe, que en ocasiones esta no permiten evaluar la cantidad de alternativas que se pueden realizar con los heurísticos y metaheurísticos, por la capacidad de este último de evaluar soluciones con métodos iterativos.	Un problema de asignación de redes generalizadas, que permite generar soluciones pseudo-óptimas iniciales, las cuales son mejoradas por medio de un metaheurístico de búsqueda Tabú.

Fuente: Elaboración propia

los antecedentes y estado del arte del uso de los métodos analíticos, heurísticos y metaheurísticos, en el análisis y diseño de la gestión de almacenes (ver cuadro.2)

De las propuestas presentadas de utilización de métodos analíticos, heurísticos y metaheurísticos, se puede inferir que estos son utilizados para encontrar soluciones óptimas y pseudo-óptimas a problemas relacionados con el diseño de la gestión de almacenes en aspectos relacionados con operaciones, recursos, layout, entre otros, en los cuales, se busca maximizar la eficiencia y minimizar tiempos de operaciones y usos de recursos.

En cuanto a limitaciones identificadas en los artículos revisados, se encuentra la complejidad de formular en algunos problemas de diseño de la gestión de almacenes, especialmente las funciones objetivos que determinan las variables de respuestas a minimizar y maximizar, y las restricciones en recursos asociados. Adicionalmente, se revisó en los artículos el uso conjunto de métodos analíticos, heurísticos y metaheurísticos con la simulación discreta por la capacidad de este último de evaluar alternativas de diseño, considerando condiciones de incertidumbre.

Finalmente, se puede indicar, que en el estado del arte del tema, se puede considerar un enfoque, el cual, consiste en el uso conjunto de los métodos analíticos, heurísticos, metaheurísticos y simulación discreta. La razón de aplicar dicha combinación, se debe a que los heurísticos, metaheurísticos y métodos analíticos permiten generar soluciones factibles y de menor costo en el nivel macro, lo cual, permite el aprovechamiento de recursos y acercarse a un valor óptimo o pseudo-óptimo. Por su parte, la simulación, tiene la capacidad de representar sistemas, apoyar la toma de decisiones y evaluar las soluciones generadas por las primeras.

A. Diseño de Experimentos

Según Montgomery [38], el Diseño de Experimentos (DOE) es una técnica que permite planear y ejecutar experimentos, y analizar estadísticamente los datos resultantes, con el fin de obtener conclusiones validas y objetivas. Por su parte, Mathews [39], la define como una técnica formal estructurada para estudiar situaciones que impliquen que una respuesta pueda variar en función de una o más variables independientes o factores, e inclusive se pueden presentar interacciones entre ellas. En tanto, Rekab y Shaikh [40], lo definen como la planeación, diseño y ejecución de pruebas o conjuntos de estas, por medio de las cuales se realizan cambios sistemáticos sobre las variables de entrada del proceso con el fin de observar los cambios o efectos en las respuestas de salida de un proceso, lo cual, puede mejorar la eficiencia y eficacia en su diseño.

En artículos científicos, se han identificado algunas propuestas de aplicación del DOE en el diseño de almacenes, tales como, Petersen II [41], Chin y Pontes [19], y Ekren, Heragu, Krishnamurthy y Malmborg [42]. El primer autor, utiliza DOE para evaluar y seleccionar el método de ruteo, el impacto de

la forma de almacén y la ubicación sobre los tiempos de preparación de pedidos, entre otras políticas de su operación. En tanto, los segundos autores utilizan la simulación discreta y el diseño factorial 2^n para representar y evaluar alternativas de diseño de las operaciones de preparación de pedidos buscando disminuir su tiempo promedio de ejecución. Por su parte, los terceros autores, desarrollan un modelo de simulación y un diseño factorial para representar un sistema de almacenamiento y recuperación automática de productos basado en un vehículo autónomo o en inglés AVS/RS (*Autonomous Vehicle System Retrieval System*), y evaluar los factores que afectan su desempeño como parte de su etapa de diseño en la gestión de almacenes.

V. PROPUESTA DE LA UTILIZACIÓN DE LA SIMULACIÓN DISCRETA EN EL DISEÑO DE LA GESTIÓN DE ALMACENES

Una vez revisados y analizados algunos métodos cuantitativos que apoyan el diseño de gestión de almacenes. A continuación, se presenta una propuesta que justifica la selección del enfoque de simulación discreta y diseño experimental o DOE.

La simulación discreta, la cual posee la capacidad de representación de sistemas y procesos reales a través de modelos en 2D y 3D, con los cuales, se puede analizar su comportamiento y evaluar alternativas, incluyendo costos operativos, estrategias de operaciones, tiempos de respuesta, utilización de recursos, equipo de manejo de materiales, entre otros aspectos. Adicionalmente, se identificó, que esta herramienta permite experimentar sobre un modelo computacional, lo cual, conlleva a que se disminuyan los costos de evaluación de alternativas, se evite parar o causar retrasos en el sistema real y se evalúen el efecto de acciones y decisiones antes de ser implementadas desarrollando diferentes enfoques de experimentación [23],[27], [28],[43], [44]

En cuanto al uso del diseño experimental este permite reemplazar el enfoque de experimentación empírica o basada en análisis de sensibilidad, los cuales, generalmente son empleados para el análisis y toma de decisiones sobre los resultados de los modelos de simulación discreta, lo cual, se puede convertir en una oportunidad para explorar y fortalecer esa línea de investigación, incluyendo el aumento de las capacidades en diseño de gestión de almacenes. Finalmente, en el próximo numeral, se presentan los antecedentes y estado del arte de las metodologías, la simulación discreta y el DOE aplicados de manera conjunta en el diseño de la gestión de almacenes.

Aunque, se identificó y revisó que la simulación discreta junto a los métodos analíticos, heurísticos y metaheurísticos ha sido ampliamente aplicada en el ámbito académico y empresarial en el diseño de almacenes, en la presente propuesta, se pretende usar el diseño experimental y la simulación

discreta como herramientas cuantitativas de apoyo para el desarrollo de la Tesis de maestría, anteriormente mencionada. La justificación, se fundamenta, en que el DOE, posee la capacidad para planear y ejecutar experimentos, y analizar estadísticamente el efecto de diferentes factores independientes sobre la variable respuesta o indicadores que midan el desempeño de la gestión de almacenes a diseñar, lo cual, conlleva una experimentación eficiente en costos y tiempo [38]. Adicionalmente, en la última década en la literatura científica, se han identificado usos del DOE y la simulación discreta en el diseño de gestión de almacenes. Un ejemplo de esta situación, son los artículos científicos desarrollados por Chin, Pontes y Porto [19] y Ekren *et al.* [42], los cuales, utilizan la simulación discreta para representar las operaciones de la gestión de almacenes bajo estudio y aplican un factorial 2^n , para determinar el mejor diseño en términos de reducción de tiempos de preparación de pedidos y las operaciones asociadas. De estos casos, se infiere que la simulación discreta no sólo permite representar el sistema bajo estudio, sino experimentar sobre el modelo computacional evaluando diferentes cambios en sus parámetros y configuraciones

Finalmente, con el enfoque que se propone para el diseño de almacenes, se busca contribuir al fortalecimiento del desarrollo de esta línea de conocimiento dentro de la agenda de investigación en el estado del arte del tema.

VI. CONCLUSIONES

Del artículo, se puede indicar que la gestión de almacenes es un proceso logístico, que impacta en la cadena de suministro, ya que es un medio que permite a las empresas que la integran, gestionar menores niveles de inventarios y efectuar sus actividades en tiempos de respuesta más cortos, intentando mejorar la satisfacción de los clientes y aumentar la eficiencia operacional, por lo cual, se hace importante que sea diseñado, administrado y controlado adecuadamente.

De la revisión de algunos artículos de los antecedentes y el estado del arte de la utilización de métodos cuantitativos en el diseño de la gestión de almacenes, se identificaron algunos, tales como: métodos analíticos, heurísticos, metaheurísticos, simulación discreta, dinámica de sistemas y diseño experimental, los cuales, se enfocan a que el diseño de este proceso logístico, se realice de una manera eficiente y eficaz, respecto al uso de recursos, tiempo, y satisfacción de las necesidades de los clientes.

De los diferentes métodos cuantitativos revisados, se puede indicar que el uso conjunto de la simulación discreta y el diseño experimental, puede considerarse como una oportunidad para mejorar y aumentar las capacidades de la gestión de almacenes, ya que el primero permite representar, analizar y evaluar políticas,

operaciones y recursos considerando condiciones de incertidumbre. Por su parte, el DOE, tiene capacidades para planear y ejecutar experimentos, incluyendo el análisis estadístico de factores que afectan el desempeño del proceso en diseño. Adicionalmente, en el estado del arte del tema, se identifica el uso de estos dos métodos como una oportunidad de investigación.

Finalmente, en artículos científicos futuros, se presentará una propuesta metodológica del uso de la simulación discreta y DOE para apoyar las actividades de diseño de la gestión de almacenes o centros de distribución, la cual, sea replicable y contribuya a la agenda de investigación del tema.

RECONOCIMIENTOS

El presente artículo, se realiza como uno de los resultados de la tesis de maestría en Ingeniería Administrativa : Desarrollo de un modelo para apoyar el diseño o mejoramiento de las operaciones y recursos de la gestión de almacenes basado en simulación discreta y diseño experimental.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. H. Ballou, *Logística*, 5th ed. México: Pearson Educación, 2004. pp 10-20
- [2] J. J. Coyle, C. J. Langley, y E. J. Bardi, *Supply chain management*. 8th ed, The United States: Cengage Learning, 2009, pp 3-5
- [3] Student (2009, Jul 14). *Supply Chain* [Online]. Available: http://janinejacques.com/MIS/MIS1_files/frame.htm#slide0024.htm
- [4] J. P. V. D. Berg y W. H. M. Zijm, "Models for warehouse management: Classification and examples," *International Journal of Production Economics*, vol. 59, n°. 1, pp. 519-528, 1999.
- [5] H. Min, "Application of a decision support system to strategic warehousing decisions," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, vol. 39, n°. 4, pp. 270 - 281, 2009.
- [6] P. Baker y Z. Halim, "An exploration of warehouse automation implementations: cost, service and flexibility issues," *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 12, n°. 2, pp. 129-138, 2007.
- [7] E. Frazelle, *World-class warehousing and material handling*, 1st ed. The United States: McGraw-Hill Professional, 2002.
- [8] J. A. Tompkins y J. D. Smith, *Warehouse Management Handbook*, 2nd ed. Raleigh: Tompkins Press, 1998.
- [9] R. Quante, H. Meyr, y M. Fleischmann, "Revenue management and demand fulfillment: matching applications, models, and software," *OR Spectrum*, vol. 31, n°. 1, pp. 31-62, 2008.
- [10] J. Gu, M. Goetschalckx, y L. F. McGinnis, "Research on warehouse operation: A comprehensive review," *European Journal of Operational Research*, vol. 177, n°. 1, pp. 1-21, Feb. 2007.
- [11] D. A. Bodner, T. Govindaraj, K. N. Karathur, N. F. Zerangue, y L. F. McGinnis, "A process model and support tools for warehouse design," in *Proceedings of the 2002 NSF design, service and manufacturing grantees and research conference*, 2002.
- [12] J. P. Van den Berg, "A literature survey on planning and control of warehousing systems," *IIE Transactions*, vol. 31, n°. 8, pp. 751-762, 1999.
- [13] P. Baker y M. Canessa, "Warehouse design: A structured approach," *European Journal of Operational Research*, vol. 193, n°. 2, pp. 425-436, Mar. 2009.
- [14] J. Gu, M. Goetschalckx, y L. F. McGinnis, "Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review," *European Journal of Operational Research*, vol. 203, n°. 3, pp. 539-549, Jun. 2010.
- [15] M. S. Obaidat y G. I. Papadimitriou, *Applied system simulation: methodologies and applications*, 1st ed. Massachusetts: Springer, 2003.
- [16] H. S. Hwang y G. S. Cho, "A performance evaluation model for order picking warehouse design," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 51, n°. 2, pp. 335-342, Oct. 2006.
- [17] C. Lin y I. Lu, "The procedure of determining the order picking strategies in distribution center," *International Journal of Production Economics*, pp. 301-307, Abr. 1999.
- [18] F. Caron, G. Marchet, y A. Perego, "Layout design in manual picking systems: a simulation approach," *Integrated Manufacturing Systems*, vol. 11, n°. 2, pp. 94 - 104, 2000.
- [19] S. Y. Chin, H. L. J. Pontes, y A. J. V. Porto, "Retrieving process analysis in a parts distribution center: a case study of manual trolley fleet substitution," in *Proceedings of the 37th conference on Winter simulation*, pp. 2506-2512, 2005.
- [20] Chulung Lee, Huei Chuen Huang, P. Goldsman, Bin Liu, y Zhiyong Xu, "Reservation storage policy for AS/RS at air cargo terminals," in *Simulation Conference*, 2005 *Proceedings of the Winter*, pp 6, 2005.
- [21] I. Potrc, T. Lerher, J. Kramberger, y M. Sraml, "Simulation model of multi-shuttle automated storage and retrieval systems," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 157, pp. 236-244, Dic. 2004.
- [22] Y. H. Lee, M. Hwan Lee, y S. Hur, "Optimal design of rack structure with modular cell in AS/RS," *International Journal of Production Economics*, vol. 98, n°. 2, pp. 172-178, Nov. 2005.
- [23] S. Takakuwa, H. Takizawa, K. Ito, y S. Hiraoka, "Simulation and analysis of non-automated distribution warehouses," in *Simulation Conference Proceedings*, 2000. *Winter*, vol. 2, pp. 1177-1184 vol.2, 2000.
- [24] D. Burnett y T. LeBaron, "Efficiently modeling warehouse systems," in *Simulation Conference*, 2001. *Proceedings of the Winter*, vol. 2, pp. 1001-1006 vol.2, 2001.
- [25] J. Macro y R. Salmi, "A simulation tool to determine warehouse efficiencies and storage allocations," in *Simulation Conference*, 2002. *Proceedings of the Winter*, vol. 2, pp. 1274-1281 vol.2, 2002.
- [26] J. Gagliardi, "A simulation model to improve warehouse operations," in *Simulation Conference*, 2007 *Winter*, pp. 2012-2018, 2007.
- [27] R. Buil y M. A. Piera, "Warehouse redesign to satisfy tight supply chain management constraints," *WSEAS Trans. Info. Sci. and App.*, vol. 5, n°. 3, pp. 286-291, 2008.
- [28] A. Greasley, "Using simulation for facility design: A case study," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 16, n°. 6, pp. 670-677, Jul. 2008.
- [29] B. P. Zeigler, H. Praehofer, y T. G. Kim, *Theory of modeling and simulation: integrating discrete event and continuous complex dynamic systems*, 1st Ed. California: Academic Press, 2000.

- [30] I. Dyner, G. Peña y S. Arango, "Modelamiento para la simulación de sistemas socio-económicos y naturales", 1st ed., Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2008
- [31] D. J. Bowersox, "Planning Physical Distribution Operations with Dynamic Simulation," *The Journal of Marketing*, vol. 36, n°. 1, pp. 17-25, Ene. 1972.
- [32] J. Sosa, *Linear programming*. 1st Ed, Paris: Librairie Droz, 1966.
- [33] X. Li, M. Baki, y Y. Aneja, "An ant colony optimization metaheuristic for machine-part cell formation problems," *Computers & Operations Research*, vol. 37, n°. 12, pp. 2071-2081, Dic. 2010.
- [34] H. R. Lourenco, J. P. Paixao, y R. Portugal, "Multiobjective Metaheuristics for the Bus Driver Scheduling Problem," *TRANSPORTATION SCIENCE*, vol. 35, n°. 3, pp. 331-343, Ago. 2001.
- [35] F. Chang, Z. Liu, Z. Xin, y D. Liu, "Research on Order Picking Optimization Problem of Automated Warehouse," *Systems Engineering - Theory & Practice*, vol. 27, n°. 2, pp. 139-143, Feb. 2007.
- [36] C. Almeder, M. Preusser, y R. F. Hartl, "Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches?," *OR Spectrum*, vol. 31, n°. 1, pp. 95-119, 2008.
- [37] W. Chiang, R. Russell, X. Xu, y D. Zepeda, "A simulation/metaheuristic approach to newspaper production and distribution supply chain problems," *International Journal of Production Economics*, vol. 121, n°. 2, pp. 752-767, Oct. 2009.
- [38] Montgomery Douglas, *Design and analysis of experiments*, 7th ed. The United States: Wiley, 2008.
- [39] Paul G. Mathews, *Design of experiments with MINITAB*, 1st ed. Wisconsin: American Society for Quality, 2005.
- [40] K. Rekab y M. Shaikh, *Statistical design of experiments with engineering applications*, 1st ed. CRC Press, 2005.
- [41] C. G. P. II, "An evaluation of order picking routing policies," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 17, n°. 11, pp. 1098 - 1111, 1997.
- [42] B. Y. Ekren, S. S. Heragu, A. Krishnamurthy, y C. J. Malmborg, "Simulation based experimental design to identify factors affecting performance of AVS/RS," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 58, n°. 1, pp. 175-185, Feb. 2010.
- [43] W. B. Rouse y K. R. Boff, *Organizational simulation*, 1st ed. New Jersey: John Wiley and Sons, 2005.
- [44] Y. Lan y B. Unhelkar, *Global integrated supply chain systems*, 1st ed. Hershey: Idea Group Inc (IGI), 2005.
- [45] R.A. Gómez, *Desarrollo de modelo para apoyar el diseño o mejoramiento de las operaciones y recursos de la gestión de almacenes basado en simulación discreta y diseño experimental*, Tesis. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2010 (En proceso de evaluación).

Rodrigo Andrés Gómez Montoya. Candidato a magister en Ingeniería Administrativa e Ingeniero Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. En la actualidad, se desempeña como investigador y consultor en las líneas de investigación de diseño y mejoramiento de sistemas logísticos y productivos a través de simulación y estadística aplicada. Además, posee diversas ponencias y publicaciones en revistas nacionales relacionadas con el tema. Además, docente del programa de Ingeniería Industrial de la Corporación Universitaria Lasallista.

Alexander Alberto Correa Espinal. Doctor en Investigación de Operaciones y Estadística Universidad Politécnica de Cataluña; magister en Ingeniería Industrial Universidad de los Andes e Ingeniero Industrial Universidad Nacional de Colombia. En la actualidad, es Profesor Asociado de la Escuela de Ingeniería de la Organización de la Facultad de Minas, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Las líneas de investigación se asocian con el diseño y mejoramiento de sistemas logísticos y productivos a través de estadística aplicada. Se tienen diversas ponencias y publicaciones en revistas nacionales e internacionales relacionadas con el tema.

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín

Facultad de Minas

120 años 
TRABAJO Y RECTITUD

Escuela de Ingeniería de Sistemas

Grupos de Investigación

Grupo de Investigación en Sistemas e Informática

Categoría A de Excelencia Colciencias
2004 - 2006 y 2000.

GIDIA: Grupo de Investigación y Desarrollo en Inteligencia Artificial

Categoría A de Excelencia Colciencias
2006 - 2009.



Grupo de Ingeniería de Software

Categoría C Colciencias 2006.

Grupo de Finanzas Computacionales

Categoría C Colciencias 2006.



Centro de Excelencia en Complejidad

Colciencias 2006

Escuela de Ingeniería de Sistemas
Dirección Postal:
Carrera 80 No. 65 - 223 Bloque M8A
Facultad de Minas. Medellín - Colombia
Tel: (574) 4255350 Fax: (574) 4255365
Email: esistema@unalmed.edu.co
<http://pisis.unalmed.edu.co/>

