

**Modelo de optimización para el diseño de un Sistema Automatizado de Almacenamiento y
Recuperación considerando el costo de operación y asimetría en la demanda**

Autor

Juan Pablo Vargas Diaz

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Industrial

Directora

Laura Yeraldín Escobar Rodríguez

Magister en Ingeniería Industrial

Codirector

Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento

Magister en Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Estudios Industriales y Empresariales
Ingeniería Industrial
Bucaramanga
2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, Pablo y Elida, los cuales me han apoyado y respaldado en cada una de mis decisiones y en toda mi formación académica y personal. Gracias por cada consejo, cada palabra y cada aliento cuando las situaciones me hacían querer renunciar y rendirme. Hoy este logro es mas de ustedes que mío, los amo.

A mis hermanos Luis Carlos y Paola, los cuales desde que soy niño me tendieron su mano y me enseñaron que no importa la diferencia de edad, los hermanos son para toda la vida.

A mi pareja Carolina, quien vivió mis momentos más altos de estrés y me entregó su apoyo en las circunstancias en las que me sentía desfallecer, en las situaciones más difíciles tiene las palabras adecuadas y con una sonrisa me motiva a salir adelante.

A mi amigo Juan Felipe, por entregarme su amistad desde el principio de la carrera y, gracias a él y su familia, obtuve un segundo hogar en Bucaramanga, gracias por todo amigo y sé que el destino nos volverá a juntar otra vez para reírnos de la vida.

A Margarita y David, los cuales me enseñaron el valor de vivir cada día como el último y me regalaron las aventuras más locas de mi vida, a ustedes muchas gracias por cada momento vivido y por todo su apoyo en los momentos más difíciles.

A Sareth, por permitirme conocer un corazón tan bonito en un escenario adverso como la pandemia, gracias por cada risa, cada consejo y por ser una amiga incondicional.

A mis amigos de Duitama, Cristian, Andrés y Fabio, los cuales hacen que volver a mi tierrita, sea entrar a un mar lleno de recuerdos y risas.

A mis amigos del Loft Vanessa, Julián, Agustín, Peña y Laura sus risas cuando llegaba al edificio eran mi motivo para distraer mi cabeza de los problemas y guardo esa etapa para siempre en mi corazón.

*A mi familia, abuelos, tíos y primos, por hacer parte de mi formación, gracias por su
cariño, entrega y amor.*

*A María Andrea, la cual ha sido una salvación para muchos estudiantes, incluyéndome,
gracias por ayudarme cada día en este proceso.*

*A mis amigos de la universidad que conocí desde el primer día y los que fui encontrando
en el camino, gracias por hacer parte de este viaje, este logro también es gracias a ustedes*

Por último, a mí, a Juan Pablo, esto es por todas las veces que dijiste “no puedo”.

Vas a ser grande, te lo aseguro.

Juan Pablo Vargas Diaz

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander y sus docentes, por otorgarme el conocimiento necesario para el desarrollo de este trabajo y formarme como un profesional íntegro.

A la profesora Laura Escobar, por su dirección de este trabajo de grado, además por brindarme sus conocimientos y apoyo para el desarrollo del mismo.

Al profesor Edgar Córdoba, quien me brindó su acompañamiento como codirector, gracias por todos los consejos y conocimientos, pero por encima de todo gracias por brindarme su amistad.

A mi jefa de auxiliatura Laura Pérez, por muchas veces brindarme su apoyo y espacios de tiempo para poder culminar satisfactoriamente este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos.....	14
1.1. Objetivo general.....	14
1.2. Objetivos específicos	14
2. Metodología	15
2.1. Definición del problema de interés y recolección de datos relevantes	15
2.2. Formulación del modelo matemático.....	16
2.3. Obtención de soluciones a partir del modelo.....	17
2.4. Experimentación a través del modelo	17
2.5. Recopilación y síntesis de los resultados	17
3. Revisión de literatura	18
3.1. Análisis bibliométrico.....	18
3.2. Análisis de literatura	24
3.2.1. Modelos de programación matemática	28
3.2.1.1. Programación lineal	28
3.2.1.2. Programación no lineal	29
3.2.2. Modelos analíticos y de simulación.....	30
3.2.3. Discusión de la revisión	31
4. Definición del problema	32
5. Formulación del modelo matemático.....	34
5.1. Parámetros de entrada	34

5.2. Supuestos del modelo	37
5.3. Criterio de asignación Producto – Posición en la estantería	37
5.4. Definición del factor de clase F_i	38
5.5. Criterio para obtener las dimensiones óptimas a través del modelo matemático y una heurística	40
6. Experimentación y resultados a partir del modelo.....	44
7. Análisis de los resultados.....	49
8. Conclusiones.....	50
Referencias bibliográficas.....	52
Apéndices.....	56

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Tabla de cumplimiento de objetivos	13
Tabla 2 Decisiones de Diseño AS/RS – Parte A.....	25
Tabla 3 Decisiones de Diseño AS/RS – Parte B.....	26
Tabla 4 Decisiones de control AS/RS – Parte A.....	26
Tabla 5 Decisiones de control AS/RS – Parte B.....	27
Tabla 6 Decisiones de control AS/RS – Parte C.....	27
Tabla 7 Ejemplo número de ubicaciones para cada clase ABC.....	38
Tabla 8 Versión del Software y Especificaciones del equipo utilizado.....	44
Tabla 9 Parámetros utilizados para la experimentación del modelo.....	45

Lista de Figuras

Figura 1 Ecuaciones de búsqueda..... 19

Figura 2 Resultados de la búsqueda de documentos..... 19

Figura 3 Análisis de concurrencias - Palabras claves documentos..... 20

Figura 4 Número de documentos por año..... 21

Figura 5 Número de citas por año 22

Figura 6 Documentos por autor 22

Figura 7 Documentos por país 23

Figura 8 Documentos por área de estudio 24

Figura 9 Dimensiones de la estantería 36

Figura 10 Posibles soluciones del modelo matemático 41

Figura 11 Ejemplo Solución B - Parte A 41

Figura 12 Ejemplo Solución B - Parte B 42

Figura 13 Ejemplo Solución B - Parte C 42

Figura 14 Ejemplo Solución B - Parte D 43

Figura 15 Resultado análisis con distribución de clases 20-30-50 46

Figura 16 Resultado análisis con distribución de clases 20-20-60 47

Lista de Apéndices

Apéndice A Bitácora de referencias bibliográficas para la revisión de literatura

Apéndice B Experimentación criterio asignación Producto – Posición en la estantería.....

Apéndice C Ejemplo de aplicación del método heurístico

Apéndice D Código del modelo matemático en Matlab

Apéndice E Experimentación modelo matemático distribución 20-30-50 56

Apéndice F Experimentación modelo matemático distribución 20-20-60 56

Apéndice G Artículo científico de carácter publicable

Resumen

Título: Modelo de optimización para el diseño de un Sistema Automatizado de Almacenamiento y Recuperación considerando el costo de operación y asimetría en la demanda *

Autor: Juan Pablo Vargas Díaz **

Palabras Clave: Sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación, AS/RS, Modelo de programación matemática, Almacenamiento basado en clases, Diseño de almacenes, Costo de operación

Descripción:

Los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación de producto o AS/RS por sus siglas en inglés, se presentan como una solución innovadora para entornos logísticos, ya que contribuye a mejorar la seguridad y rendimiento de dichos entornos. Los AS/RS están compuestos por un sistema de estanterías, pasillos, puntos de entrada y salida de material; y grúas programadas. Estos componentes realizan sus funciones con base a las necesidades del sistema, existiendo así múltiples decisiones físicas, de control y de rendimiento, las cuales son necesarias de abordar desde diferentes perspectivas, como las que son mostradas en la presente investigación.

En este trabajo, se realiza la propuesta de un modelo de optimización para un AS/RS de una sola estantería con grúa de plataforma simple y almacenamiento basado en clases. Donde se busca que el modelo entregue como resultado el diseño de unas dimensiones óptimas para la estantería del sistema AS/RS teniendo en cuenta parámetros como el costo total de operación del sistema y la asimetría de la demanda. El modelo utilizado se acompaña por métodos heurísticos donde se discretizan posibles soluciones factibles para la resolución del problema. De los resultados se concluye que existe un efecto claro en el dimensionamiento de la estantería del sistema en parámetros como la asimetría de la demanda, el costo total operativo del sistema y la cantidad de productos a ubicar.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Ingeniería Industrial. Directora: Laura Yeraldín Escobar Rodríguez – Magister en Ingeniería Industrial. Codirector: Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento – Magister en Ingeniería Industrial

Abstract

Title: Optimization model for the design of an Automated Storage and Retrieval System considering operating cost and demand asymmetry *

Author(s): Juan Pablo Vargas Díaz**

Key Words: Automated storage and retrieval systems, AS/RS, Mathematical programming model, Class-based storage, Warehouse design, Operation cost

Description:

Automated storage and retrieval systems, or AS/RS, are an innovative solution for logistics environments, helping to improve safety and performance. The AS/RS is composed of a system of racks, aisles, material entry and exit points, and programmed cranes. These components perform their functions based on the needs of the system, thus there are multiple physical, control and performance decisions, which are necessary to address from different perspectives, such as those shown in this research.

In this study, an optimization model is proposed for a single-rack AS/RS with a single platform crane and class-based storage. The model is intended to deliver as a result the design of optimal dimensions for the AS/RS system rack considering parameters such as the total operating cost of the system and the asymmetry of the demand. The model used is accompanied by heuristic methods where possible feasible solutions for solving the problem are discretized. From the results it is concluded that there is a clear effect on the sizing of the system shelf on parameters such as the asymmetry of demand, the total operating cost of the system and the quantity of products to be located.

* Degree Work

** Faculty of Ingenierías Fisicomecánicas. School of Estudios Industriales y Empresariales. Ingeniería Industrial. Director: Laura Yeraldín Escobar Rodríguez – Master in Industrial Engineering. Codirector: Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento – Master in Industrial Engineering.

Introducción

La evolución constante en el entorno de la gestión de almacenamiento y la logística ha provocado que exista un interés creciente en los Sistemas Automatizados de Almacenamiento y Recuperación de producto (AS/RS, Automated Storage and Retrieval System). En los últimos 30 años ha aumentado la participación de estos almacenes automatizados a escala mundial; además, en comparación con los almacenes tradicionales, permite un mayor nivel de eficiencia tecnológica (Lerher y Matjaz, 2012). Los AS/RS son sistemas que cumplen la función de ser soluciones para entornos logísticos y de producción. Se componen según Metahri y Hachemi (2018) de varias partes, como las estanterías, los pasillos, las máquinas de almacenamiento y recuperación (S/R, Storage and Retrieval), las estaciones de recogida/entrega (P/D, Pickup and Delivery), las estaciones de entrada y salida de producto (I/O, Input and Output) y un sistema de control de operaciones. Las máquinas de almacenamiento y recuperación son grúas totalmente automatizadas que pueden recoger y dejar cargas.

Los AS/RS cuentan con diferentes decisiones de diseño y control, las cuales pueden abordar la capacidad y el número de máquinas (S/R), la cantidad de pasillos, la cantidad, el tamaño y la profundidad de la estantería, los métodos de secuenciación, entre otros Roodbergen & Vis, (2009). Además, teniendo en cuenta lo anterior, se puede afirmar que un dimensionamiento adecuado de la estantería en un AS/RS demuestra ser un factor clave para maximizar la utilización del espacio y disminuir los costos operativos. Por otro lado, la eficiencia operativa de un AS/RS depende de la capacidad de la estantería de adaptarse a los cambios en la demanda, por tal razón, incluir la asimetría de la demanda, propone un desafío interesante a la hora de dimensionar la estantería de un AS/RS.

Por tal motivo, la presente investigación busca desarrollar un modelo de optimización para el dimensionamiento de la estantería de un AS/RS considerando el costo de operación y la asimetría de la demanda.

El presente documento se encuentra estructurado de la siguiente manera: en la sección 1 se describen los objetivos de la investigación, por otro lado en las secciones 2, 3 y 4 se encuentran la metodología de la investigación, la revisión de literatura y la definición del problema, respectivamente, mientras que las secciones 5, 6 y 7 corresponden a la formulación del modelo matemático, la experimentación y análisis de resultados del mencionado. Por último, en la sección 8 se presentan las conclusiones de la investigación, además de las referencias bibliográficas utilizadas y los apéndices del proyecto.

Tabla 1

Tabla de cumplimiento de objetivos

Objetivo	Cumplimiento
Identificar las estrategias de programación matemática para la toma de decisiones de diseño en un AS/RS a través de una revisión de literatura.	Ver Sección 3.2.3 (Discusión de la revisión)
Construir un modelo de programación matemática para la definición de las dimensiones de la estantería de un AS/RS desde el costo de operación	Ver Sección 5 (Formulación del modelo matemático)
Evaluar el efecto del factor de asimetría de la demanda en las dimensiones de la estantería a través del modelo propuesto.	Ver Sección 6 (Experimentación y resultados a partir del modelo)
Elaborar un artículo académico de carácter publicable con base en la investigación realizada y los resultados obtenidos.	Ver Apéndice G Artículo científico de carácter publicable)

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo de optimización para el dimensionamiento de estantería de un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación considerando el costo de operación y asimetría en la demanda.

1.2. Objetivos específicos

- Identificar las estrategias de programación matemática para la toma de decisiones de diseño en un AS/RS a través de una revisión de literatura.
- Construir un modelo de programación matemática para la definición de las dimensiones de la estantería de un AS/RS desde el costo de operación
- Evaluar el efecto del factor de asimetría de la demanda en las dimensiones de la estantería a través del modelo propuesto.
- Elaborar un artículo académico de carácter publicable con base en la investigación realizada y los resultados obtenidos.

2. Metodología

Para el presente proyecto, se adapta la metodología es la planteada por Hillier & Lieberman (2010) la cual está enfocada en los estudios en investigación de operaciones. Esta consta de las siguientes fases propuestas para esta investigación:

2.1. Definición del problema de interés y recolección de datos relevantes

En esta primera fase se resume el problema de interés, para esto fijamos unos objetivos, teniendo en cuenta el alcance y las restricciones del proyecto, para así, poder realizar una revisión de literatura en bases de datos reconocidas, esto con el objetivo de lograr caracterizar la investigación y encontrar fuentes y estudios que respalden el presente proyecto. Lo anterior se fundamentado a través de las siguientes actividades:

- Formulación del problema con claridad en los objetivos, alcance y restricciones del proyecto.
- Búsqueda y recolección de datos a través de la formulación y ejecución de una ecuación de búsqueda con sus respectivas restricciones en las bases de datos proporcionadas por la Universidad Industrial de Santander.
- Evaluación de los resultados obtenidos por la ecuación de búsqueda, a través de un análisis bibliométrico.
- Análisis de información mediante una revisión de literatura, en la cual se tenga comprensión de la clasificación, la composición, los enfoques y los métodos de optimización y desarrollo de los AS/RS.

- Síntesis de información, mediante una bitácora ordenada donde se hagan clasificaciones correspondientes para obtener de manera más sencilla la información necesaria para el planteamiento del modelo.

2.2. Formulación del modelo matemático

Teniendo en cuenta lo obtenido en la fase anterior, se procede a la construcción de un modelo matemático que permita diseñar de manera óptima las dimensiones de la estantería del AS/RS; sin embargo, hay que tener en cuenta que el modelo comprende una gran variedad de decisiones de diseño y control, las cuales para ser definidas requieren datos con base en literatura, así que, el modelo propuesto es un modelo general para la toma de decisiones. Lo anterior se realizará a través de las siguientes actividades:

- Definir e identificar los parámetros de entrada que alimentaran el modelo matemático, estos parámetros cumplen la función de definir las instancias con las que se evalúa el modelo propuesto.

Al definir lo anterior, se procede al planteamiento del modelo matemático, para el cual es necesario definir los siguientes componentes:

- Variables de decisión: Estas variables son las que están vinculadas con el dimensionamiento de la estantería
- Función objetivo: Esta función relaciona el costo de operación, considerando la clase del producto y la ubicación de este.
- Conjunto de restricciones: Describe aspectos del sistema, como la política de almacenamiento, capacidades, secuenciación, entre otros.

Para las salidas del modelo matemático es necesario tener en cuenta las variables de decisión correspondientes, para así poder llegar a la medición del rendimiento del sistema, mediante el cálculo de indicadores obtenidos luego del estudio.

2.3. Obtención de soluciones a partir del modelo

Para obtener los resultados y soluciones deseadas provenientes del modelo matemático, es necesario primero, lograr codificarlo en un software, el cual, cumpla con los criterios computacionales y de solución al modelo matemático. Para esto se hace selección de dos softwares, los cuales, sus licencias son adquiridas y otorgadas por la Universidad Industrial de Santander. En primer lugar, se selecciona a Matlab, pero llegado el caso sus funciones resulten insuficientes, se cuenta con el apoyo del software GAMS, para dar solución al modelo matemático.

Al finalizar esta elección se codifica el modelo y se verifica los resultados obtenidos.

2.4. Experimentación a través del modelo

Realizadas las etapas anteriores, se evalúa el efecto del factor de asimetría de la demanda en las dimensiones de la estantería a través del modelo propuesto, para así, poder establecer las mejores disposiciones para el sistema estudiado.

2.5. Recopilación y síntesis de los resultados

Se procede a realizar la recopilación obtenida a partir de los resultados arrojados por la totalidad de la investigación, se procede a ser organizada y sintetizada, para así posteriormente dar cumplimiento al último objetivo de este estudio siguiente estas actividades:

- Elaboración del libro de proyecto de grado.
- Construcción de un artículo académico de carácter publicable en el cual se presente el modelo matemático implementado para un sistema AS/RS y los resultados obtenidos.

3. Revisión de literatura

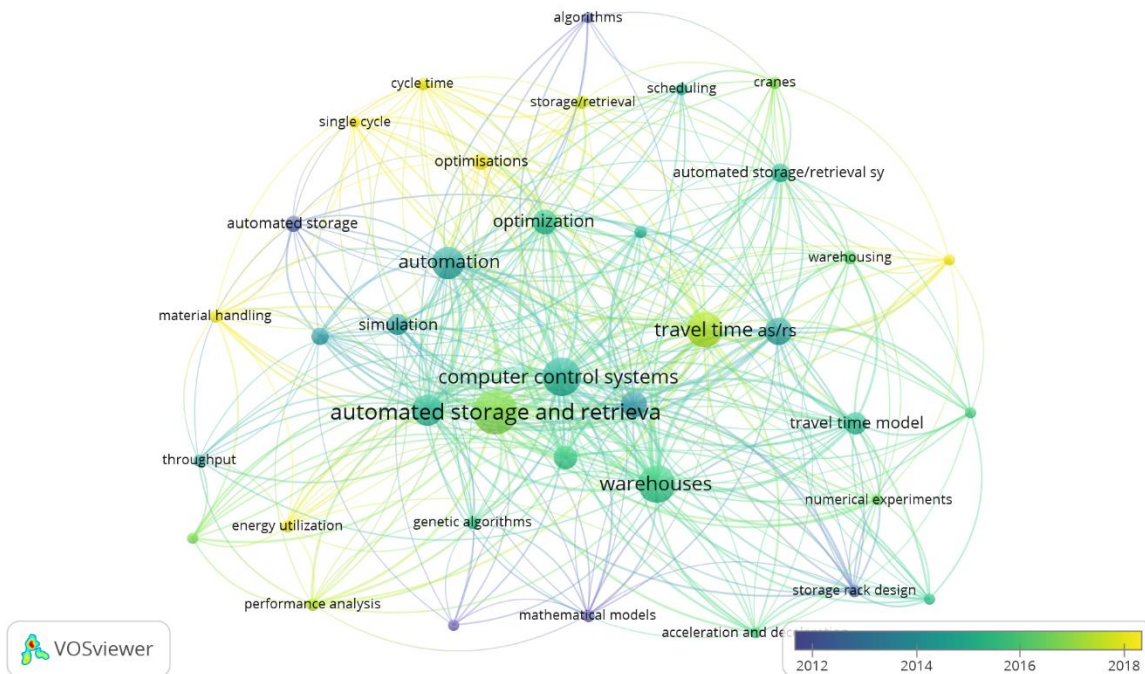
3.1. Análisis bibliométrico

Los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación a través de los años han ido teniendo grandes avances tecnológicos y aportes al sector industrial, desde su aparición en los años 50 y su consolidación a la industria, ha sido objeto de gran variedad de investigaciones, las cuales buscan desarrollar nuevos modelos y esquemas, que logren optimizar el sistema, trayendo así menores costos, mayor eficiencia y rendimiento.

Por lo tanto, se propone una búsqueda a través de las bases de datos suministradas por la Universidad Industrial de Santander, en la cual se identifique los avances, aportes y principales investigaciones realizadas en este tópico. En primer lugar, se plantea la ecuación de búsqueda correspondiente, en la cual, se enlazan palabras y términos consecuentes al objeto de estudio, la búsqueda es restringida a los campos de título, resumen o palabras claves. Los resultados son delimitados a áreas de estudio referentes a ingeniería y sus derivados, además de tener en cuenta solo los artículos publicados en el siglo XXI y que su tipología de documento sea capítulo de libro o artículos científicos. Solo se tienen en cuenta los documentos que estén disponibles en inglés. A continuación, la Figura 1 se muestra las ecuaciones de búsqueda utilizadas en las bases de datos Scopus y Web of Science.

Con la ayuda del software VOSviewer se hace un análisis de concurrencias de las palabras clave, en la cual se tiene un mínimo de 4 concurrencias, los principales resultados son mostrados en la Figura 3.

Figura 3
Análisis de concurrencias - Palabras claves documentos



Al realizar el respectivo análisis de la información obtenida por la Figura 3, se puede notar la concurrencia de las palabras claves encontradas, en primer lugar, se puede notar a lo largo de los años el estudio de los AS/RS, los tópicos con mayor interés son los tiempos de viaje, los tiempos de ciclo y el rendimiento; además, es notable que la temática ha sido estudiada en diferentes perspectivas como: Modelos matemáticos, modelos de simulación y metaheurísticas como los algoritmos genéticos.

Para analizar la evolución del estudio de los AS/RS, es necesario ver el comportamiento a través de los años de las publicaciones de artículos referentes a la temática estudiada. En la Figura 4, se puede apreciar dos picos importantes, en el año 2015 y en el año 2018, donde se publicarían

10 y 9 documentos científicos respectivamente, cabe aclarar que estos registros van hasta el momento que se realizó la ecuación de búsqueda en el año 2023.

Figura 4

Número de documentos por año



Al estudiar a fondo la temática de los AS/RS se puede concluir que al pasar los años es un tema que genera cada vez más interés entre la población mundial, esto puede ser respaldado por los datos obtenidos con la ecuación de búsqueda como lo representa la Figura 5, donde se puede notar una curva ascendente en las citaciones desde el 2018 hasta la actualidad.

Figura 5

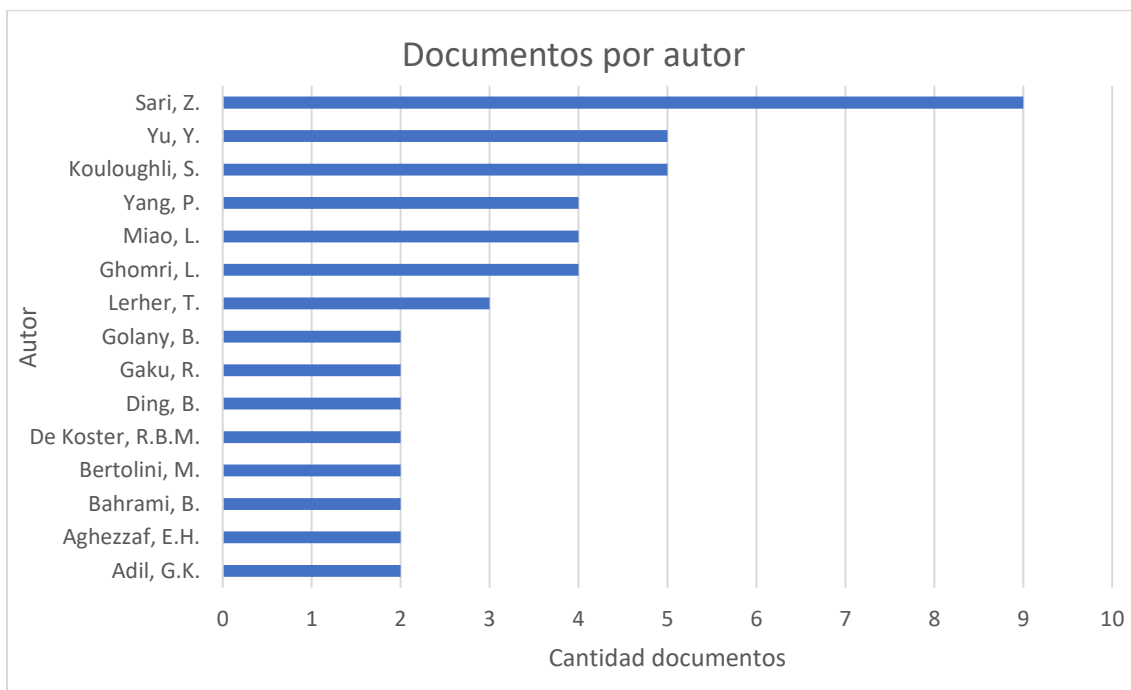
Número de citas por año



Gran variedad de autores han realizado aportes correspondientes al estudio de los AS/RS, sin embargo, en la Figura 6 se presentan los 15 autores con mayor número de documentos publicados respecto al tema, donde podemos destacar nombres como Sari, Yu y Kouloughli, los cuales tienen entre 5 y 9 artículos publicados.

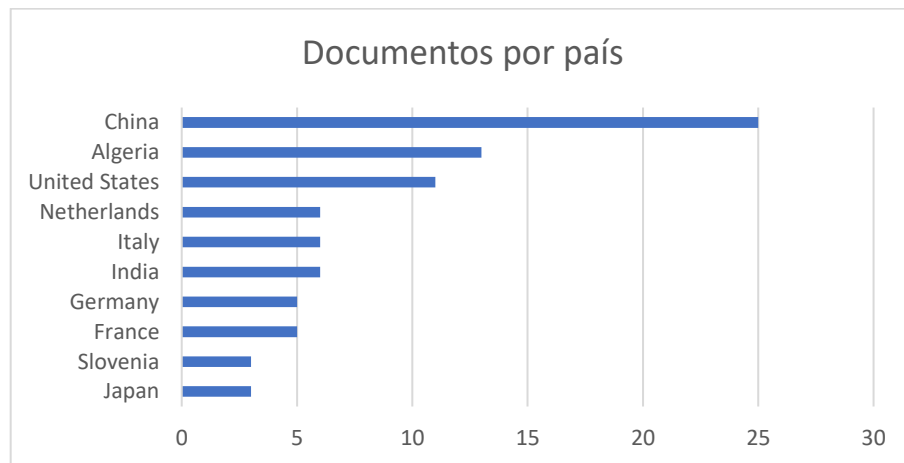
Figura 6

Documentos por autor



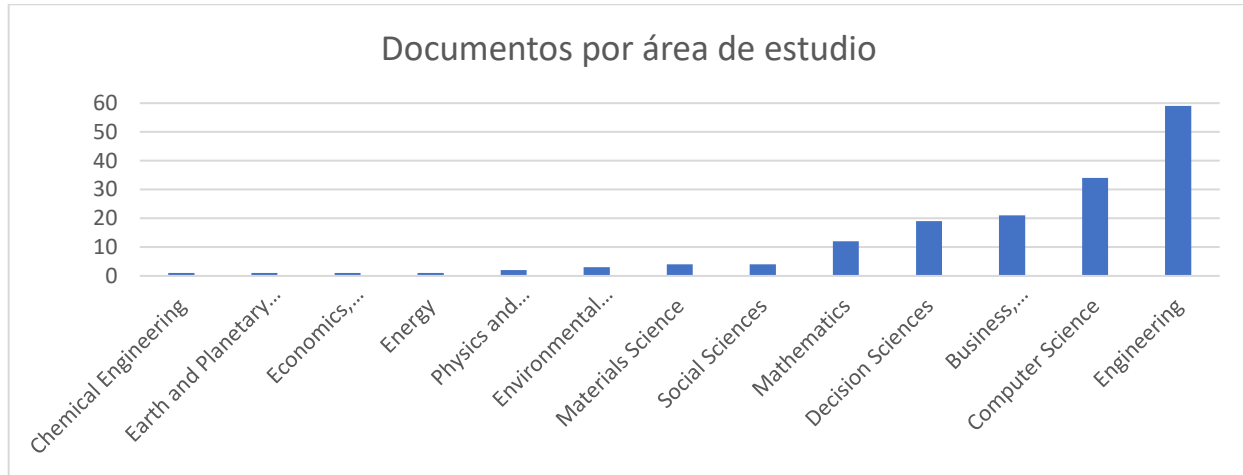
La Figura 7 muestra el número de publicaciones por país de origen, es posible notar que China es con diferencia el país que más documentos tiene publicados respecto al tema con un total de 25 documentos, esta seguido por Argelia y Estados Unidos, es necesario aclarar que para el gráfico solo se tuvieron en cuenta países con más de 3 documentos publicados.

Figura 7
Documentos por país



Los AS/RS abarca diferentes enfoques y áreas de estudio, en la Figura 8 se puede apreciar que la mayoría de los documentos publicados acerca de la temática se enfocan en el área de ingeniería, seguido por las áreas de las ciencias de la computación, los negocios y gerencia, y las ciencias de toma de decisiones (Ver Apéndice A).

Figura 8
Documentos por área de estudio



3.2. Análisis de literatura

Al pasar los años las grandes industrias han intentado mejorar y modernizar sus procesos para obtener un mejor rendimiento. Un gran problema al que se han enfrentado son decisiones referentes al almacenamiento y distribución de sus productos, por esta misma razón, las tecnologías especializadas en estas decisiones han tenido un crecimiento exponencial en los últimos 50 años, tiempo en el cual se han desarrollado e implementado poco a poco los Sistemas Automatizados de Almacenamiento y Recuperación de producto (AS/RS por sus siglas en inglés). Estos sistemas suplen las necesidades y resuelven la mayoría de las problemáticas mencionadas anteriormente, ya que ofrecen ventajas en su utilización. Según Lerher & Matjaz (2012) los AS/RS tienen 4 ventajas: El aumento en el rendimiento y capacidad de almacenamiento, la alta fiabilidad y mejor control en los procesos de almacenamiento, una gran mejora en las condiciones de seguridad y la disminución de daños y pérdidas de mercancías. Además de como establece Metahri y Hachemi (2018) también la implementación de estos sistemas tiene ventajas como el ahorro en mano de obra y optimización del espacio físico del almacén.

Para una estructuración de un AS/RS es necesario tener en claro varios factores y decisiones, los cuales varían según la problemática y las necesidades específicas del sistema. Estas decisiones se clasifican en dos: decisiones de diseño y decisiones de control. Las decisiones de diseño se encargan de comprender la organización y distribución del espacio y los componentes del sistema en sus distintas áreas operativas, tales como la cantidad de pasillos, grúas, estanterías entre otros varios. Mientras que las decisiones de control llevan la gestión, monitorización de los productos, la asignación de ubicaciones del almacén, las políticas de almacenamiento y operación, entre otros. En la Tabla 2, Tabla 3, Tabla 4, Tabla 5 y Tabla 6 se muestra una clasificación de los tipos de AS/RS que se pueden definir teniendo en cuenta las decisiones anteriormente mencionadas, esta clasificación se hace con base en la investigación realizada por Roodbergen y Vis (2009).

Tabla 2
Decisiones de Diseño AS/RS – Parte A

Elección del Sistema		
Grúas	Movimiento	Pasillos dedicados
		Pasillos cambiantes
	Plataforma	Sencilla
		Doble
Múltiple		
Manipulación del material	Picking	Persona a bordo
		Al final del pasillo (Mini load)
		Unidad de carga
	Tipo de carga	Pallets
		Contenedores
Tipo de estante	Estantes estacionarios	Profundidad simple
		Profundidad doble
	Estantes móviles	En rieles
		Tipo carrusel

Tabla 3
Decisiones de Diseño AS/RS – Parte B

Configuración del sistema		
Número de pasillos	Uno	
	Múltiples	
Tamaño de estante	Cuadrado en función del tiempo	
	Rectangular	
Numero de grúas		
Tamaño de las ubicaciones de almacenamiento	Regulares	
	Irregulares	
Puntos de ingreso y salida de material	Número de pasillos	Uno
		Múltiples
	Tipo	Consolidado
		Independientes
	Ubicación	
Capacidad de buffer		

Tabla 4
Decisiones de control AS/RS – Parte A

Asignación de ubicaciones de almacenamiento	
Almacenamiento dedicado	
Almacenamiento aleatorio	
Almacenamiento en la ubicación abierta más cercana	
Almacenamiento basado en la frecuencia de salida (Demanda)	
Almacenamiento basado en clases	
Batching	
Tipo	Estático
	Dinámico
Tamaño de lote	Basado en tiempo
	Basado en capacidad
Selección de política de asignación de las ordenes en los lotes	

Tabla 5
Decisiones de control AS/RS – Parte B

Secuencia de picking (A/R)		
Restricciones de operación		
Tipo de operación	Comando simple	
	Comando doble	
	Comando múltiple	
Tipo de programación	Por bloques	
	Dinámica	
Método de secuenciación	Métodos heurísticos	Primero en llegar – Primero en ser atendido (R)
		Menor tiempo de finalización (R)
		Vecino más cercano (A/R)
		Menos distancia extra (A)
	Problema del agente viajero asimétrico (A/R)	
Métodos exactos	Programación lineal	

Nota: (A): Almacenamiento, (R): Recuperación, (A/R): Almacenamiento/Recuperación)

Tabla 6
Decisiones de control AS/RS – Parte C

Puntos de espera	
Tipo de posicionamiento	Estático
	Dinámico
Ubicación	En el punto de ingreso de material
	En un punto medio del estante
	En el punto de ingreso/salida de material
	En la última ubicación

Teniendo en cuenta lo anterior, las decisiones de diseño juegan un papel fundamental al momento de definir las dimensiones del sistema, ya que, de una correcta toma de decisiones en el dimensionamiento de cada componente del sistema, se puede lograr un aumento en el rendimiento y la calidad de atención al cliente, mientras existe una minimización en los costos de operación. En literatura se ha encontrado que para el modelado de un AS/RS los autores proponen tres

perspectivas: Modelos analíticos, Modelos de simulación y Modelos matemáticos. A continuación, se realiza una descripción de las perspectivas de modelados y los enfoques en los que se llevaron a cabo.

3.2.1. Modelos de programación matemática

Los modelos de programación matemática resultan ideales en la toma de decisiones en los problemas de optimización, en la revisión de literatura realizada se puede percibir que los autores realizan sus procesos en dos tipos de programación: lineal y no lineal. A continuación, se describen los enfoques de ambas perspectivas:

3.2.1.1. Programación lineal

Esta perspectiva ha sido utilizada para estudiar aspectos como la optimización de dimensiones, en el caso de la investigación realizada por Metahri & Hachemi (2018) se buscaba desarrollar un modelo matemático mediante programación lineal para encontrar las dimensiones óptimas (altura, profundidad y ancho) para un free-fall-flow rack (Estantería de flujo y caída libre) Dicho algoritmo es evaluado mediante el tiempo mínimo de recuperación del producto del sistema; esto se llevó a cabo a través de un modelo discreto, el cual, estimaba un promedio de este tiempo de recuperación. También existen otras investigaciones similares en la utilización de Flow racks como la de Ghomri y Sari (2015) donde el modelo se propone en función de las dimensiones del rack y en la variedad de productos almacenados en el sistema y sus proporciones. Con esto, se busca el mínimo tiempo de recuperación del producto. Resulta importante tener en cuenta que el sistema involucra otros factores de diseño y control como: un solo rack con profundidad simple, dos grúas; una para operaciones de almacenamiento y otra para operaciones de recuperación;

además, el sistema comprende un almacenamiento aleatorio. Cabe aclarar que la validación de este modelo se hizo a través de simulación.

En otros casos, se hace énfasis en la manipulación del material, en el caso de (Lerher & Matjaz, 2012) se realizó un modelo matemático cuya función objetivo buscaba mínimo costo total del sistema, enfocado en un sistema con uno o múltiples pasillos, y asumiendo manipulación de material de carga única.

3.2.1.2. Programación no lineal

Diversas investigaciones adoptan esta perspectiva de modelado, en su mayoría, priorizando las decisiones de diseño, en especial las de dimensiones del sistema, por ejemplo, Kouloughli et al., (2022) optimiza las dimensiones del sistema AS/RS con estantes móviles para una minimización del tiempo de ciclo unitario, similar a la investigación de Kouloughli & Sari, (2015) donde también busca la optimización de las dimensiones del sistema AS/RS pero en este caso con estanterías fijas y múltiples pasillos, también desde la perspectiva del tiempo de ciclo. Sihem & Malika, (2020) optimiza las dimensiones del sistema AS/RS multi pasillo para minimizar el tiempo de viaje entre el punto de almacenamiento y el punto de recuperación de producto, consideran el tiempo de ciclo continuo. Por otro lado, Hamzaoui et al., (2019) propone una comparación entre un método heurístico y un método matemático para obtener las mejores dimensiones del sistema AS/RS, el cual, cuenta con una estantería y dos máquinas de almacenamiento y recuperación de producto. Yang et al., (2017) considera un modelo para diseñar un estante con múltiple profundidad para un AS/RS con políticas de almacenamiento basadas en rotación, el cual, tiene la intervención del modelo de velocidad no aproximada de la grúa de almacenamiento y recuperación de producto. También Yu y De Koster (2009) propone un modelo para el diseño de una estantería

óptima, con la diferencia que el AS/RS estudiado considera una política de almacenamiento basada en clases, donde se busca la relación óptima entre las tres dimensiones del rack con la curva ABC, la cual, varia gracias a un parámetro de asimetría de demanda. El mismo De Koster et al., (2008), en otra investigación, plantea un modelo para diseñar un estante óptimo, en donde, a partir del tiempo de viaje esperado, calcula la relación óptima entre las tres dimensiones, basado en una política de almacenamiento aleatorio. Por ultimo Ghomri et al., (2009) propone un modelo continuo para los tiempos de ciclos simples y dobles, optimizando las dimensiones del AS/RS.

3.2.2. Modelos analíticos y de simulación

En literatura, algunas decisiones se toman desde la perspectiva de modelado, por tal razón, las perspectivas de modelos analíticos y de simulación fueron analizadas para fortalecer la investigación, sin embargo, fueron encontrados modelos analíticos que tuvieron una validación de resultados a través de simulación. En los modelos analíticos es posible encontrar aportes con diferentes decisiones de diseño y control como en Fandi et al., (2022) el cual propone un modelo analítico para un sistema AS/RS con múltiples pasillos y múltiples plataforma, para así lograr unas dimensiones optimas del sistema. Además, múltiples investigaciones proponen modelos analíticos para la optimización de las dimensiones de todo del AS/RS. Metahri & Hachemi (2018) proponen un modelo analítico basado en el tiempo esperado de recuperación de producto, para así llevar a cabo la toma de decisiones para optimizar un estante de flujo de caída libre, evaluando el rendimiento del sistema y comparando las políticas de almacenamiento. Por otro lado Sari y Hamzaoui (2013) desarrollan un modelo donde se evalúan los tiempos de viaje mínimos de la grúa de almacenamiento y recuperación, en donde se utiliza una técnica de enumeración para encontrar las dimensiones optimas del AS/RS Flow rack.

También fueron propuestos modelos con el objetivo de evaluar y cuantificar el tiempo de ciclo del AS/RS, es el caso de Gamberi et al., (2012), quién propone un modelo para el cálculo del tiempo de viaje en un AS/RS con almacenamiento basado en clases (ABC) y estantería rectangular en el tiempo; y así mismo, Ashayeri et al., (2002) presenta un modelo analítico exacto basado en la geometría, el cual, al ejecutar comandos únicos y dobles de secuenciación, calcula el tiempo de ciclo esperado para la máquina de almacenamiento y recuperación de producto.

Finalmente, investigaciones como la de Alnahhal et al., (2022) buscan mejorar el rendimiento de los AS/RS mediante un modelo analítico para la reubicación de los puntos de ingreso y salida de producto, validada posteriormente mediante un modelo de simulación digital.

3.2.3. Discusión de la revisión

A partir de la revisión realizada y teniendo en cuenta que el presente proyecto tiene como objetivo realizar un modelo de optimización para el dimensionamiento de un AS/RS, se define que la investigación debe ser realizada mediante la perspectiva de los modelos de programación matemática, ya que esta perspectiva es la que nos permite mediante ciertos parámetros llegar a ese valor óptimo necesario, mediante una correcta elección de restricciones y función objetivo.

Teniendo en cuenta las decisiones de diseño y control encontradas en literatura. Inicialmente el AS/RS a desarrollar será de un solo pasillo, con grúa de plataforma sencilla; una sola estantería estacionaria, de profundidad simple; con una política de almacenamiento basada en clases teniendo en cuenta el factor asimetría de la demanda.

Por último, la métrica escogida para evaluar el AS/RS es el costo de operación, el cual indicará mediante su minimización, el valor óptimo de las dimensiones de la estantería, este costo puede ser obtenido de los tiempos de ciclo que arroja el sistema; sin embargo, es importante

entender y nutrir la investigación con las condiciones y conclusiones de las otras perspectivas, todo esto para un mejor fortalecimiento de información a la hora de llevar a cabo el modelo.

4. Definición del problema

La automatización cumple la función de reducir la intervención humana en los procesos de las industrias, haciendo que estas implementen tecnologías para realizar, en su mayor parte, tareas repetitivas, aumentando su importancia en las industrias actuales dada la era digital tras la cuarta revolución industrial. Según Nieto (2006) la automatización trae beneficios como el mejoramiento de estándares de calidad, la reducción de pérdidas en producción, el incremento de la repetibilidad y la estabilidad de los procesos de manufactura, la reducción del trabajo físico y repetitivo, la obtención de mayor continuidad de la producción en días feriados, el mejoramiento de la relación costo beneficio, el predominio de visión abierta para dimensionar la necesidad y la selección de la oferta técnica y económica más viable en términos de tecnología de automatización.

Teniendo en cuenta los beneficios de la automatización en las industrias, y en el caso particular del sector logístico, surgen como objeto de estudio los AS/RS, los cuales son definidos por Schenone et al., (2020) como sistemas de almacenamiento y recuperación de productos utilizados en entornos tanto de distribución como de producción, los cuales tienen como componentes básicos racks de almacenamiento, ubicaciones de almacenamiento, maquinas o grúas apiladoras automatizadas con control computarizado para almacenar y recuperar unidades de carga sin interferencia humana. Además, Schenone et al., (2020) también establece las numerosas ventajas de la utilización de los AS/RS como: la utilización eficiente del espacio de almacenamiento, la reducción de daños y elusión de mercancías, mayor control sobre las tareas de almacenamiento y recuperación, y la disminución del número de trabajadores en el almacén.

El mundo y sus necesidades también han influido en el desarrollo de los AS/RS. De acuerdo a Brezovnik et al., (2015) la evolución de los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS) se está acelerando debido a las crecientes necesidades económicas y logísticas. Además, es de conocimiento común que, como establece Roodbergen & Vis (2009), el mundo actual es de cambios rápidos en la demanda de los clientes, pequeños pedidos por Internet, entregas ajustadas horarios, alta competencia y requisitos de alto nivel de servicio, así será cada vez más difícil mantener un buen rendimiento en las industrias si continúan utilizando las mismas técnicas de solución.

En el diseño de un AS/RS se contemplan diferentes decisiones dependiendo del tipo de problema presentado y considerando la configuración física del sistema. Las decisiones de diseño en los AS/RS involucran la definición del número de pasillos, las dimensiones de la estantería, la longitud y cantidad de los pasillos, la ubicación, número y capacidad de los puntos de entrada y salida de material, entre otros. Es importante tener en cuenta correcto estudio previo en el dimensionamiento de la estantería del AS/RS, ya que un mal diseño puede llevar a menor rendimiento en el sistema, mayores cuellos de botella e incremento en los costos de operación. Por lo anterior, el presente proyecto propone un modelo de optimización para el dimensionamiento de la estantería de un AS/RS abordado desde el costo de operación, teniendo en cuenta que lo fundamental para cualquier estrategia y diseño de almacén es la minimización de costos mientras se logra el nivel deseado de servicio al cliente Moynihan y Padmanabhan (2005) El sistema objeto de estudio involucra un solo pasillo, estanterías fijas y almacenamiento basado en clases, además de que el costo de operación se propone variable a partir de la ubicación de almacenamiento en la estantería y de la clase de producto manipulado. Lo previamente mencionado, permite que a través del modelo matemático y el comportamiento de la demanda se definan las decisiones relacionadas

con las ubicaciones de los diferentes tipos de producto y las dimensiones de la estantería, y así, beneficiar a entornos industriales reales que consideren sistemas similares al estudiado.

5. Formulación del modelo matemático

Teniendo en cuenta lo mencionado en la sección 3 y considerando las diferentes decisiones de diseño y control de los AS/RS, se formula un modelo matemático el cual permita diseñar de manera óptima las dimensiones de la estantería del AS/RS, mediante la minimización del costo operativo total del sistema y satisfaciendo una demanda de productos totalmente, teniendo en cuenta los costos operativos y las variaciones de la asimetría de la demanda con un almacenamiento basado en clases. A continuación, en las siguientes secciones se describen los parámetros de entrada, los supuestos y la descripción del modelo matemático:

5.1. Parámetros de entrada

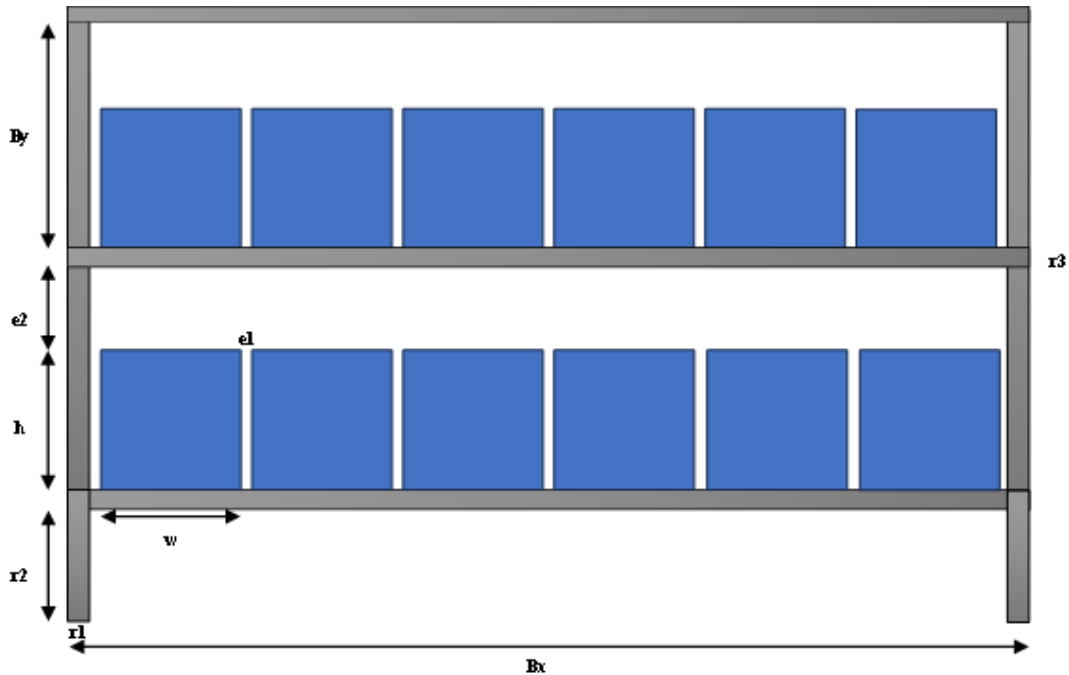
- **Diseño físico:** El sistema automatizado de almacenamiento y recuperación de producto aplicado en este proyecto está compuesto por los siguientes componentes físicos: Un estante discreto con un pasillo correspondiente; además, este mismo estante está compuesto estructuralmente por bahías, niveles, vigas, columnas y posiciones. Además el punto de entrada y salida de material es ubicado en la esquina inferior izquierda del estante, adaptando así, una de las opciones propuestas por Manzini (2012) en el capítulo 8 de su libro.
- **Número de clases:** Teniendo en cuenta lo expresado por Gamberi et al.(2012) se consideran 3 niveles de clase (ABC) ya que esta política de almacenamiento trae beneficios para las operaciones en sistemas automatizados.

- **Tamaño de clases:** Para el caso de estudio se establece los tamaños de clase de la siguiente manera: 20% para la categoría A y el 80% restante repartido entre las categorías B y C, todo esto apoyado en los estudios de Gagliardi et al. (2015).
- **Factor de asimetría:** Según lo establecido por Gagliardi et al. (2012) para definir el comportamiento de la curva de demanda acumulada del sistema se hace con base a la siguiente expresión $G(i) = \left(\frac{i}{n}\right)^s$ (1) , donde $G(i)$ es la demanda acumulada de la referencia i , n corresponde al total de SKU y s es el factor de asimetría, el cual siempre está en un valor entre 0 y 1.
- **Numero de ubicaciones a asignar:** Para conocer el número de posiciones a asignar a cada clase teniendo en proporción a su demanda se propone la expresión $a_i = L \left[\left(\frac{i}{n}\right)^s - \left(\frac{i-1}{n}\right)^s \right]$ (2) donde L define el número total de productos a asignar, mientras que a_i son las posiciones asignadas a cada referencia i , n corresponde al total de SKU y s es el factor de asimetría, el cual siempre está en un valor entre 0 y 1.(Gagliardi et al., 2012).
- **Dimensiones internas de la estantería:** Basado en el capítulo 9 del libro de Manzini (2012) es importante dar precisión a las dimensiones de los diferentes componentes del sistema. En primer lugar, la posición es definida por 2 dimensiones (alto h , ancho w) además el largo de la posición es tomado como la profundidad de la estantería. Por otro lado, tenemos las dimensiones de las columnas ($r1$), los soportes de la estantería ($r2$), las vigas ($r3$), el espacio entre posiciones ($e1$) y el espacio entre niveles ($e3$) los cuales comprenden las medidas internas de la estantería (Ver Figura 9).
- **Dimensiones estantería:** Inicialmente se conoce las medidas del estante, ya que se dan unas dimensiones inmensas, para así, al momento de ejecutar el modelo los datos tengan

la capacidad de adaptarse libremente al espacio, para posteriormente ser acotados en las medidas reales.

- Costos:** Para lograr la meta de optimizar el costo operativo total del sistema, se plantea la siguiente expresión $C_{ij} = [\max(Tx, Ty) * \$] * F_i$ (3) la cual se basa la expresión de evaluación de los tiempos de ciclo $\max(Tx, Ty)$ planteada por Lerher et al (2010) donde es claro que es necesario detallar términos de velocidad y distancia $[\max(tx, ty) = \max\left(\frac{d_x}{v_x}, \frac{d_y}{v_y}\right)$ (4). Asimismo, es multiplicado por un factor dinero \$ y un Factor de clase i (F_i), dicho factor proviene de la siguiente expresión $F_i = \frac{P_i}{\text{Min}(P_i)}$ (5) donde P_i es el promedio de ubicaciones de producto por clase i.
- Capacidad máxima:** La capacidad máxima del sistema está expresada por la cantidad total de productos a ubicar en el estante del AS/RS.

Figura 9
Dimensiones de la estantería



5.2. Supuestos del modelo

S1: Las dimensiones internas del estante ($w, h, e_1, e_2, e_3, r_1, r_2$) y las velocidades de la grúa (v_1 y v_2) son tomadas de estudio hecho por Córdoba (2023). Las cuales son utilizadas para obtener los tiempos de ciclo de almacenamiento y recuperación del producto.

S2: La demanda total de productos a ubicar y el número total de SKU son conocidos.

S3: Al ser un modelo con solo un estante y un pasillo, se adapta lo propuesto por Manzini (2012) y se trabaja solo con 2 dimensiones en el rack (ancho y alto).

S4: La distribución de clases se hace 20% para la categoría A y el 80% restante para las categorías B y C, con la condición de que el porcentaje de la categoría C tiene que ser mayor o igual al de la categoría B.

S5: La numeración de las posiciones aumenta de izquierda a derecha y de abajo arriba, teniendo como ubicación 1 la posición correspondiente a la esquina inferior – izquierda de la estantería.

S6: La grúa solo realiza ciclos simples de recuperación y almacenamiento de producto.

S7: Los factores de clase siempre se realizarán respecto a la clase C.

5.3. Criterio de asignación Producto – Posición en la estantería

El criterio de asignación de producto – posición en la estantería se desarrolla para poder representar cuantas posiciones de la estantería deben ser dispuestas para cada demanda de productos de las clases ABC. Para esto es necesario suponer que los artículos se ordenan de forma decreciente según su demanda como lo plantea Gagliardi et al. (2012) en su estudio, con base a esto, se realiza una adaptación y teniendo en cuenta las ecuaciones mencionadas en los parámetros de entrada se realiza el siguiente ejemplo:

“La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra un sistema con 15 referencias de producto y 100 posiciones; con un factor de asimetría de 0,5 y tamaño de clase 20-30-50 (ABC)”.

Es necesario tener en cuenta que las ubicaciones totales por clase se aproximan al entero más cercano.

Tabla 7
Ejemplo número de ubicaciones para cada clase ABC

SKU	Clase	G(i)	a(i)	Ubicaciones acumuladas	Ubicaciones por clase
1	A	0,26	25,82	25,82	45
2	A	0,37	10,69	36,51	
3	A	0,45	8,21	44,72≈45	
4	B	0,52	6,92	51,64	73-45=28
5	B	0,58	6,10	57,74	
6	B	0,63	5,51	63,25	
7	B	0,68	5,07	68,31	
8	B	0,73	4,72	73,03≈73	
9	C	0,77	4,43	77,46	100-73=27
10	C	0,82	4,19	81,65	
11	C	0,86	3,99	85,63	
12	C	0,89	3,81	89,44	
13	C	0,93	3,65	93,09	
14	C	0,97	3,51	96,61	
15	C	1,00	3,39	100,00	

Teniendo en cuenta lo obtenido, se deben asignar 45 posiciones para los productos de categoría A, 28 posiciones para los productos de categoría B y 27 posiciones para los productos de categoría C.

5.4. Definición del factor de clase Fi

Como se expresó anteriormente en los parámetros de entrada, los costos operativos son obtenidos a través de los tiempos de ciclo de la grúa para almacenar un producto o recuperarlo en la estantería, esto gracias a la distancia desde el punto de ingreso hasta la ubicación en el estante. Sin embargo, es importante tener en cuenta que cada clase de producto tiene una rotación diferente,

esto expresado por el valor de la asimetría de la demanda (s), por lo tanto, con los valores obtenidos en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es necesario crear un factor de multiplicación F_i para así hacer un ajuste en el costo operativo de la grúa para acercarlo más a la realidad.

Este factor de multiplicación nace de las ecuaciones propuestas en los parámetros de entrada, las cuales adaptadas al ejemplo quedan de la siguiente manera:

$$P_A = \left(\frac{\%U_A}{SKU_A} \right) = \frac{45\%}{3} = 0,15; P_B = \left(\frac{\%U_B}{SKU_B} \right) = \frac{28\%}{5} = 0,056; P_C = \left(\frac{\%U_C}{SKU_C} \right) = \frac{27\%}{7} = 0,0386 \quad (6)$$

$$F_A = \frac{P_A}{P_C} = \frac{0,15}{0,0386} = 3,889; F_B = \frac{P_B}{P_C} = \frac{0,056}{0,0386} = 1,452; F_C = \frac{P_C}{P_C} = \frac{0,0386}{0,0386} = 1 \quad (7)$$

Los factores F_A , F_B y F_C son multiplicados por el costo operativo de la grúa (C_j) de cada ubicación y así se obtiene el costo operativo total del sistema C_{ij} .

Parámetros del modelo

Z: Costo total

j: Número de la ubicación en el rack

J: Número de posiciones total en el rack

i: Clase del producto

I: Número total de clases

X_{ij} : Asignación del producto de clase i en la posición j

C_{ij} : Costo de ubicación de producto de clase i en la posición j

D_i : Demanda por clase de producto i

Función Objetivo: Minimiza el costo total del sistema

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J X_{ij} * C_{ij} \quad (8)$$

Restricciones

$$R1: \sum_{j=1}^J X_{ij} = D_i \quad \forall_i \quad (9)$$

$$R2: \sum_{i=1}^I X_{ij} \leq 1 \quad \forall_j \quad (10)$$

$$R3: X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall_{ij} \quad (11)$$

La restricción R1 establece que la suma de todos los productos asignados en la estantería de clase i debe ser igual a la demanda total de esa clase i. Por otro lado, la restricción R2 establece que las variables son excluyentes, esto quiere decir que en una misma ubicación solo puede ser ubicado un producto de clase i. Por último, la restricción R3 define las variables del modelo como variables binarias. Las diferentes pruebas del criterio pueden ser observadas en Apéndice B.

5.5. Criterio para obtener las dimensiones óptimas a través del modelo matemático y una heurística

Al implementar el modelo, este puede entregar dos tipos de soluciones, (1) una solución rectangular y (2) una solución con espacios vacíos en los cuales no se les asignó ningún producto (Ver Figura 10).

Figura 10
Posibles soluciones del modelo matemático

Solución A											Solución B							
2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2	3	3	2	1	2	2	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	1	1	1	1	1	1	1	3

Nota: Los números representan las clases de producto de la siguiente manera A = 1, B = 2, C = 3 y No asignado = 0

La solución A se toma como la solución óptima tanto en distribución como en dimensionamiento, mientras que para la solución B, el modelo hace de cuenta que los lugares vacíos no generan ningún costo, lo cual, llevado a la realidad, es de conocimiento que no es así, así que, es necesario buscar la solución óptima de la siguiente manera:

Siguiendo el ejemplo planteado en la Tabla 7 el cual su solución es similar a la solución tipo B expresada anteriormente como lo muestra Figura 11 el rack no es completado en su totalidad, por lo tanto, procederemos a completarlo con los elementos que generan menor costo (Los productos clase C), eso si es necesario mantener los mismos valores de los Factores de Clase F_i , para que se mantenga las proporciones al momento de obtener el costo final como lo muestra la Figura 12. El ejemplo puede ser visualizado en el Apéndice C.

Figura 11
Ejemplo Solución B - Parte A

Costo total: 1171,4294716 Unidades \$

	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	0
A = 45 productos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3
B = 28 productos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	0
C = 27 productos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	0

Figura 12
Ejemplo Solución B - Parte B

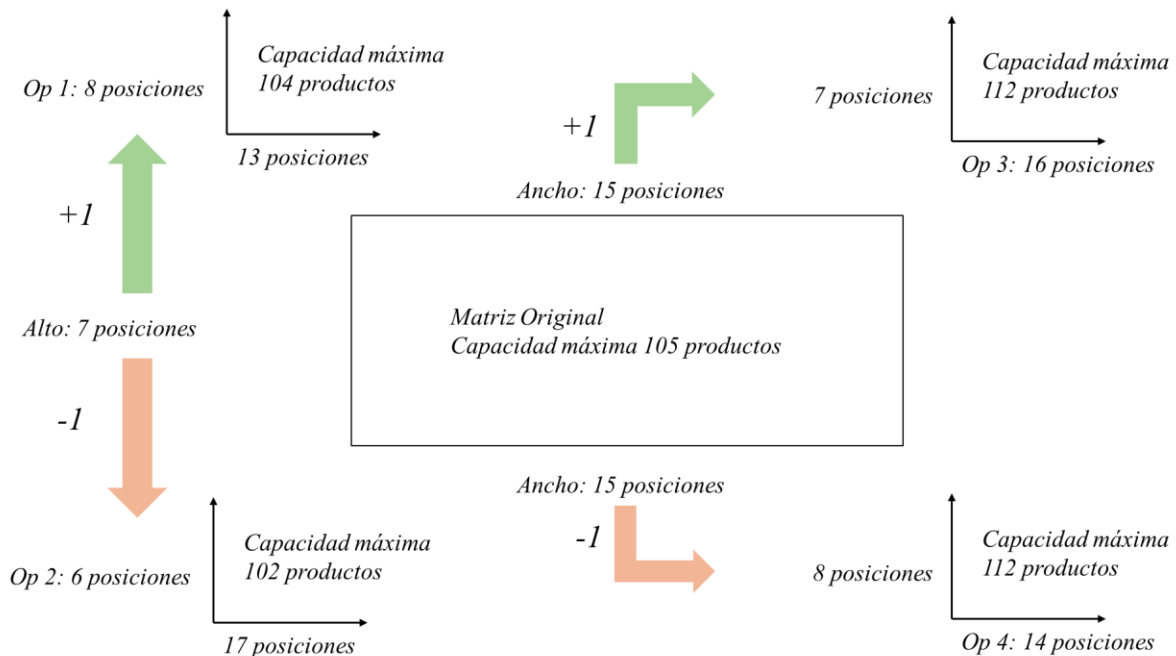
Costo total: 1215,49613827 Unidades \$

3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3

A = 45 productos
B = 28 productos
C = 32 productos

Como era de esperarse el costo total aumenta, ya que se están ubicando 5 productos en 5 posiciones más, por lo tanto, ahora es necesario saber si existe alguna mejor solución variando las dimensiones del rack, estas variaciones se hacen tomando un grupo de soluciones factibles sumando y restando filas y columnas, esto siempre, teniendo en cuenta de poder satisfacer la demanda de productos (Ver Figura 13).

Figura 13
Ejemplo Solución B - Parte C



Con este método heurístico, se procede a seleccionar las dos mejores opciones, en este caso es: Op 1 y Op 2. Posteriormente, con esas dos opciones de diferentes dimensiones se procede a asignar los productos correspondientes a la demanda, completando totalmente la capacidad máxima de cada uno, para luego, hacer una comparación con el modelo mostrado en la Figura 12. En esta comparación se termina seleccionando el modelo con menor costo, siendo así, la mejor opción de dimensionamiento y distribución.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Figura 14 se hace la comparación entre los 3 casos, dando como mejor opción OP 2 el estante de dimensiones (6 x 17 posiciones). Este estante es el resultado final para dar solución a este ejemplo.

Figura 14
Ejemplo Solución B - Parte D

		<i>Costo total: 1215,49613827 Unidades \$</i>																
<i>A = 45 productos</i>		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<i>B = 28 productos</i>		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
<i>C = 32 productos</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3		
<i>Cap: 105 productos</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3		
<i>Alto: 7 posiciones</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3		
<i>Ancho: 15 posiciones</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3		
		<i>Costo total Op 1: 1213,25389 Unidades \$</i>																
<i>A = 45 productos</i>		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<i>B = 28 productos</i>		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<i>C = 31 productos</i>		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	
<i>Cap: 104 productos</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3				
<i>Alto: 8 posiciones</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3				
<i>Ancho: 13 posiciones</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3				
		<i>Costo total Op2: 1213,18309 Unidades \$</i>																
<i>A = 45 productos</i>		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
<i>B = 28 productos</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
<i>C = 29 productos</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
<i>Cap: 102 productos</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
<i>Alto: 6 posiciones</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
<i>Ancho: 17 posiciones</i>		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3

6. Experimentación y resultados a partir del modelo

Ya con la formulación del modelo y siguiendo la metodología planteada en este proyecto, se establece la codificación correspondiente, esto con el objetivo de poder encontrar diferentes soluciones con base en el modelo. Todo esto es posible gracias a la licencia *Campus Agreement* con la cual la Universidad Industrial de Santander cuenta, como se expresó anteriormente se hace uso del software Matlab. Para el desarrollo de la codificación en el software Matlab, en la Tabla 8 se presentan las especificaciones y características del equipo utilizado para el desarrollo del código.

Tabla 8
Versión del Software y Especificaciones del equipo utilizado

Versión Software	Especificaciones del equipo
MATLAB R2024a	<ul style="list-style-type: none"> • 12 GB RAM • Procesador Intel(R) Core (TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz 1.80 GHz • Sistema operativo de 64 bits, procesador basado en x64

El código desarrollado en el software Matlab puede ser observado en el Apéndice D.

Debido a que el objetivo de este modelo es considerar los valores de costo de operación y asimetría de la demanda, es necesario someterlo a una verificación a través de un análisis de sensibilidad con la variación de parámetros, para así notar el comportamiento de variables como la asimetría de demanda y los costos de operación. Esto con el objetivo de determinar su relación con el dimensionamiento y la distribución de la estantería.

A partir de lo planteado en el modelo se realiza una verificación a través de un análisis de sensibilidad de las dimensiones de la estantería en función de la asimetría de la demanda, la distribución de clases y los productos ubicados. En la Tabla 9 se representan los parámetros que son usados para la experimentación correspondiente.

Tabla 9

Parámetros utilizados para la experimentación del modelo

Parámetro	Niveles Usados	Referencia
Factor de asimetría	{0,2; 0,5; 0,8}	Considerando $0 < s < 1$ Según Gagliardi et al., (2012)
Numero de referencias de producto	50	Propuesto para este ejemplo
Tamaño de clases	{[20 – 30 – 50]; [20 – 20 – 60]}	Adaptado a través de lo expuesto por Gagliardi et al., (2015)
Productos por ubicar	{10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100}	Propuesto a partir de la capacidad de la estantería
Ancho de la posición	0,8 (m)	
Alto de la posición	0,8 (m)	
Ancho de la columna	0,12 (m)	
Altura del primer nivel	0,3 (m)	Córdoba, (2023)
Ancho de la viga	0,162 (m)	
Espacio entre posiciones	0,1 (m)	
Espacio entre niveles	0,2 (m)	
Velocidad en x	1,5 (m/s)	Gagliardi et al., (2015)
Velocidad en y	1 (m/s)	

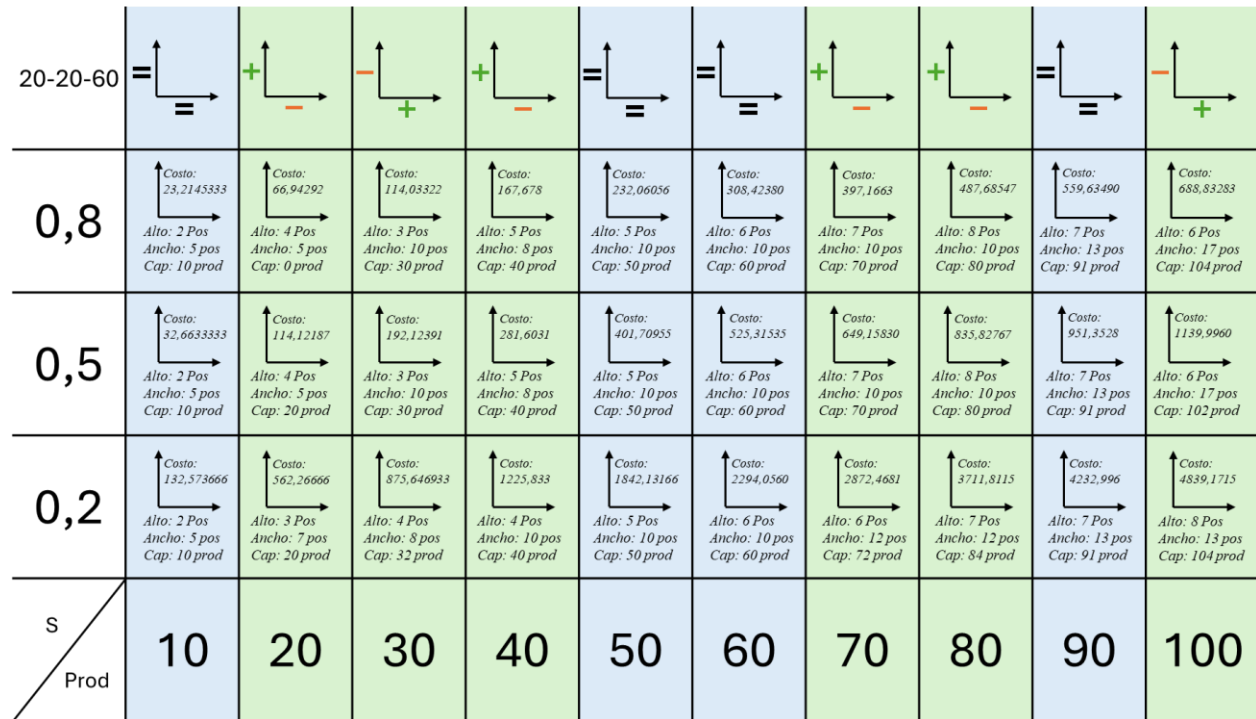
La Figura 15 representa los resultados del primer análisis realizado, el cual tiene una distribución de clases de 20-30-50 (Ver Apéndice E).

Figura 15
Resultado análisis con distribución de clases 20-30-50

20-30-50										
0,8	Costo: 24,184583 Alto: 2 Pos Ancho: 5 pos Cap: 10 prod	Costo: 68,959125 Alto: 4 Pos Ancho: 5 pos Cap: 20 prod	Costo: 116,64151 Alto: 3 Pos Ancho: 10 pos Cap: 30 prod	Costo: 172,59028 Alto: 5 Pos Ancho: 8 pos Cap: 40 prod	Costo: 239,322063 Alto: 5 Pos Ancho: 10 pos Cap: 50 prod	Costo: 306,541446 Alto: 6 Pos Ancho: 10 pos Cap: 60 prod	Costo: 396,96558 Alto: 7 Pos Ancho: 10 pos Cap: 70 prod	Costo: 500,95984 Alto: 8 Pos Ancho: 10 pos Cap: 80 prod	Costo: 576,274263 Alto: 7 Pos Ancho: 13 pos Cap: 91 prod	Costo: 692,18691 Alto: 6 Pos Ancho: 17 pos Cap: 104 prod
0,5	Costo: 36,651111 Alto: 2 Pos Ancho: 5 pos Cap: 10 prod	Costo: 109,535236 Alto: 4 Pos Ancho: 5 pos Cap: 20 prod	Costo: 194,709422 Alto: 3 Pos Ancho: 10 pos Cap: 30 prod	Costo: 293,21638 Alto: 5 Pos Ancho: 8 pos Cap: 40 prod	Costo: 393,762593 Alto: 5 Pos Ancho: 10 pos Cap: 50 prod	Costo: 533,53277 Alto: 6 Pos Ancho: 10 pos Cap: 60 prod	Costo: 705,556979 Alto: 7 Pos Ancho: 10 pos Cap: 70 prod	Costo: 878,25328 Alto: 8 Pos Ancho: 10 pos Cap: 80 prod	Costo: 1007,1736 Alto: 7 Pos Ancho: 13 pos Cap: 91 prod	Costo: 1212,0679 Alto: 6 Pos Ancho: 17 pos Cap: 104 prod
0,2	Costo: 225,613889 Alto: 2 Pos Ancho: 5 pos Cap: 10 prod	Costo: 467,00372 Alto: 4 Pos Ancho: 5 pos Cap: 20 prod	Costo: 911,001 Alto: 4 Pos Ancho: 8 pos Cap: 32 prod	Costo: 1434,08315 Alto: 4 Pos Ancho: 10 pos Cap: 40 prod	Costo: 2046,0322 Alto: 5 Pos Ancho: 10 pos Cap: 50 prod	Costo: 2385,97096 Alto: 5 Pos Ancho: 12 pos Cap: 60 prod	Costo: 3209,43228 Alto: 6 Pos Ancho: 12 pos Cap: 72 prod	Costo: 4016,3155 Alto: 7 Pos Ancho: 12 pos Cap: 84 prod	Costo: 4402,6879 Alto: 7 Pos Ancho: 13 pos Cap: 91 prod	Costo: 5269,9446 Alto: 8 Pos Ancho: 13 pos Cap: 104 prod
S Prod	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

En este primer análisis se destaca la manera cómo se comportan diferentes parámetros respecto a la asimetría de la demanda. En primer lugar, el costo operativo total de cada cantidad de producto disminuye a medida que la asimetría de la demanda aumenta: Por otro lado, la Figura 15 muestra que en las columnas de 10, 20, 50 y 90 productos sus dimensiones de la estantería se mantienen iguales sin importar la asimetría de la demanda, mientras que, en las columnas de 30, 40, 60, 70, 80 y 100 productos existen variaciones en las dimensiones del estante, ya sea aumentando o disminuyendo filas y columnas. Además, también se evidencia como en la columna 70, 80, 90 y 100 existen casos en los cuales se almacenan más productos de los solicitados en primera instancia.

Figura 16
Resultado análisis con distribución de clases 20-20-60



Adicionalmente, la Figura 16 representa el resultado en función de los mismos factores expresados anteriormente con la variación de la distribución de clases, en este caso 20-20-60, esto con el objetivo de evaluar el impacto de la asimetría de la demanda respecto al análisis mostrado en la Figura 15 (Ver Apéndice F).

Este nuevo análisis presenta algunas pequeñas variaciones respecto al anterior, como puede ser que en esta ocasión la columna de 20 artículos presenta variaciones en su dimensionamiento, mientras que la columna de 60 artículos esta vez sí permanece con el mismo dimensionamiento en los 3 niveles de asimetría. Sin embargo, el resto de los parámetros se comportan de manera similar, siendo así, los costos de operación inversamente proporcionales a la asimetría de la demanda, además, teniendo 4 columnas de productos que no varían en su dimensionamiento y 6 columnas que, si presentan variaciones, posteriormente también se observa como en las mismas columnas 70, 80, 90 y 100 se reciben en algunos casos más productos de los requeridos en primera instancia.

Ahora bien, al realizar el análisis conjunto de los resultados obtenidos de la Figura 15 y la Figura 16 se puede concluir lo siguiente: En primer lugar los costos operativos totales disminuyen mientras aumenta la asimetría de la demanda, esto es causado ya que al volverse más simétrica la demanda de los productos, esto genera el efecto que los productos más costosos (Clase A) disminuyan y los productos menos costosos (Clase C) aumenten. Adicionalmente se observa que la asimetría de la demanda si afecta el dimensionamiento considerando la cantidad de productos a asignar.

Por otro lado, es posible concluir que la asimetría de la demanda también afecta el dimensionamiento del sistema en por lo menos 6 columnas de productos, ya que se observa en los dos experimentos variaciones en sus filas y columnas. Por último, se muestra como los modelos mientras las cantidades de productos se vuelven más grandes, dan más prioridad a dimensionamientos con mayor capacidad a la solicitada inicialmente, ya que el modelo detecta que al largo plazo es mejor ubicar más productos que buscar un dimensionamiento diferente que satisfaga exactamente la demanda.

7. Análisis de los resultados

A partir de lo obtenido se evidencia en primer lugar, que si en la primera instancia del modelo se satisface toda la demanda de productos sin dejar posiciones vacías esa es la solución óptima, por otro lado, cuando existen posiciones sin rellenar, es necesario discretizar las posibles dimensiones del rack final para así, mediante un método heurístico llegar a la solución factible.

Desde el enfoque del tamaño de clases, se puede observar que no existe efecto en la tendencia de parámetros como el costo operativo total y la cantidad de productos a ubicar, si tiene un pequeño efecto en el dimensionamiento, ya que de 30 iteraciones realizadas en las dos distribuciones mostradas anteriormente genero cambio en 2 de ellas ([20 productos – 0,2 s]; [60 productos – 0,2 s]).

Desde la perspectiva de la cantidad de productos, se ve un efecto en los casos en los que hay que ubicar grandes cantidades de productos, esto debido a que se observa como la mejor solución es la que sugiere almacenar más productos de los que se tenía planeado, esto por encima de otros dimensionamientos donde se satisface la demanda exactamente. En este fenómeno tiene interferencias las velocidades utilizadas como parámetros de entrada, ya que la velocidad horizontal es mayor que la vertical, por lo tanto, al aumentar las cantidades de producto es más rentable almacenar los productos al ancho de la estantería.

Por último, desde el enfoque de la asimetría de la demanda, se ve como esta genera efecto en primer lugar en la asignación de productos de clase ABC, ya que cuando el valor de s se acerca a 1, las cantidades a ubicar de cada producto se vuelven más simétricas, esto también deriva que los costos tiendan a disminuir cuando la asimetría de la demanda se acerque a 1. Posteriormente se observa que dependiendo de las cantidades de productos a ubicar las dimensiones del rack

tienden a ocupar más espacio horizontal o vertical. Los resultados obtenidos no muestran una clara tendencia o patrón de los casos en los cuales se varían o se mantienen las dimensiones.

8. Conclusiones

En consecuencia, a los resultados obtenidos en la presente investigación, es posible concluir que, en el ambiente de gestión de procesos, almacenamiento y dirección de operaciones, es fundamental la utilización de sistemas no convencionales como los AS/RS. Además, a partir de las diferentes estrategias de modelado, adicionalmente, se considera como la mejor estrategia para la resolución de estos problemas a los modelos matemáticos, ya que son importantes para el manejo y gestión de los sistemas AS/RS, como en el caso de esta investigación permite tomar decisiones, optimizar costos y optimizar dimensiones del sistema.

Adicionalmente, se concluye que es posible realizar un modelo de programación matemática el cual, sea capaz de definir las dimensiones óptimas de una estantería de un AS/RS con base al costo de operación y la cantidad de productos a ubicar, esto así, sin tener en cuenta factores utilizados en otros estudios como los costos de instalación o actividades de secuenciación.

Finalmente, se concluye que la asimetría de la demanda si tiene un efecto en el dimensionamiento de la estantería de un AS/RS, teniendo en cuenta la cantidad de productos a ubicar. Para este caso de estudio se recomienda trabajar de 10 a 100 posiciones para mayor precisión en los resultados.

Este trabajo de grado, entrega como resultado un artículo de carácter publicable, el cual sintetiza el proceso y resultados de la presente investigación, además, se espera que este artículo sirva como punto de partida para futuras investigaciones y contribuya al avance del campo de estudio. Para futuras investigaciones se recomienda el desarrollo de modelos matemáticos para

optimizar dimensiones de las estanterías en un sistema multi-pasillo, para así ver que efecto tiene parámetros como la asimetría de la demanda, la cantidad de productos a ubicar, las referencias de productos SKU, etc. También se considera favorable estudiar a profundidad sistemas similares desde un enfoque de modelos no lineales, considerando que existen restricciones no lineales, que llevaron al uso de la heurística.

Referencias bibliográficas

- Alnahhal, M., Salah, B., & Ahmad, R. (2022). Increasing Throughput in Warehouses: The Effect of Storage Reallocation and the Location of Input/Output Station. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su14084611>
- Ashayeri, J., Heuts, R. M., Valkenburg, M. W. T., Veraart, H. C., & Wilhelm, M. R. (2002). A geometrical approach to computing expected cycle times for zone-based storage layouts in AS/RS. *International Journal of Production Research*, *40*(17), 4467–4483. <https://doi.org/10.1080/00207540210153901>
- Brezovnik, S., Gotlih, J., Balič, J., Gotlih, K., & Brezočnik, M. (2015). Optimization of an automated storage and retrieval systems by swarm intelligence. *Procedia Engineering*, *100*(January), 1309 – 1318. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.498>
- Córdoba, E. (2023). *Optimización de un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación de doble plataforma desde la perspectiva del costo y tiempo de operación*. Universidad Industrial de Santander.
- De Koster, R. B. M., Le-Duc, T., & Yugang, Y. (2008). Optimal storage rack design for a 3-dimensional compact AS/RS. *International Journal of Production Research*, *46*(6), 1495–1514. <https://doi.org/10.1080/00207540600957795>
- Fandi, W., Kouloughli, S., & Ghomri, L. (2022). Multi-shuttle AS/RS dimensions optimization using a genetic algorithm—case of the multi-aisle configuration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *120*(1–2), 1219–1236. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08787-z>
- Gagliardi, J. P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2012). On storage assignment policies for unit-load automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*,

50(3), 879–892. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.543939>

Gagliardi, J. P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2015). Sequencing approaches for multiple-aisle automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 53(19), 5873–5883. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1012600>

Gamberi, M., Manzini, R., & Regattieri, A. (2012). Analytical and Numerical Modeling of AS/RS Cycle Time in Class-Based Storage Warehousing. In *Warehousing in the Global Supply Chain: Advanced Models, Tools and Applications for Storage Systems* (Vol 9781447122). <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2274-6>

Ghomri, L., & Sari, Z. (2015). Mathematical modeling of retrieval travel time for flow-rack automated storage and retrieval systems. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 1906–1911. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.365>

Ghomri, L., Sari, Z., Guezzen, A., & Sari, T. (2009). Continuous models for single and dual cycle times of a multi aisle automated storage and retrieval system. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol 13, Number PART 1). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20090603-3-RU-2001.0144>

Hamzaoui, M. A., Arbaoui, T., Sari, Z., & Yalaoui, F. (2019). Exact and Heuristic Approaches for the Design of Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS). *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications, ICIEA 2019*, 837–842. <https://doi.org/10.1109/IEA.2019.8715076>

Hillier, F., & Lieberman, G. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones*.

Kouloughli, S., Korso Feciane, M., & Sari, Z. (2022). Mobile rack AS/RS dimensions optimization for single cycle time minimization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(3–4), 1815–1836. <https://doi.org/10.1007/s00170-022->

09450-3

- Kouloughli, S., & Sari, Z. (2015). Multi-aisle AS/RS dimensions optimization for cycle time minimization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(1–4), 675–692. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6709-3>
- Lerher, T., & Matjaz, S. (2012). Designing Unit Load Automated Storage and Retrieval Systems. In *Warehousing in the Global Supply Chain: Advanced Models, Tools and Applications for Storage Systems* (bll 211–232).
- Lerher, T., Potrč, I., Šraml, M., & Tollazzi, T. (2010). Travel time models for automated warehouses with aisle transferring storage and retrieval machine. *European Journal of Operational Research*, 205(3), 571–583. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.01.025>
- Manzini, R. (2012). *Warehousing in the Global Supply Chain*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2274-6>
- Metahri, D., & Hachemi, K. (2018a). Optimization of free-fall-flow-rack automated storage and retrieval system dimensions. *Proceedings of EDIS 2017 - 1st International Conference on Embedded and Distributed Systems, 2017-Decem*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EDIS.2017.8284042>
- Metahri, D., & Hachemi, K. (2018b). Retrieval–travel-time model for free-fall-flow-rack automated storage and retrieval system. *Journal of Industrial Engineering International*, 14(4), 807–820. <https://doi.org/10.1007/s40092-018-0263-9>
- Moynihan, G., & Padmanabhan, N. (2005). *AISLE: analytical integrated software for a logistics environment*. AISLE: analytical integrated software for a logistics environment. <https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJLSM.2006.008219>
- Nieto, E. C. (2006). Manufactura y automatización Manufacturing and automation. *Ing. Investig.*

vol.26 no.3 Bogotá Sep./Dec. 2006 ISSN 0120-5609, 26(3), 120–128.

- Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. A. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research, 194*(2), 343–362.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.038>
- Sari, Z., & Hamzaoui, A. M. (2013). Optimization of a single machine flow rack AS/RS for minimum expected travel time. In *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)* (Vol 46, Number 7). IFAC. <https://doi.org/10.3182/20130522-3-BR-4036.00021>
- Schenone, M., Mangano, G., Grimaldi, S., & Cagliano, A. C. (2020). An approach for computing AS/R systems travel times in a class-based storage configuration. *Production and Manufacturing Research, 8*(1), 273–290. <https://doi.org/10.1080/21693277.2020.1781703>
- Sihem, K., & Malika, K. F. (2020). *Multi- aisle AS/RS dimensions optimization for travel time between the storage bin and the retrieval bin minimization. 2–4.*
- Yang, P., Yang, K., Qi, M., Miao, L., & Ye, B. (2017). Designing the optimal multi-deep AS/RS storage rack under full turnover-based storage policy based on non-approximate speed model of S/R machine. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 104*, 113–130. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2017.05.010>
- Yu, Y., & De Koster, M. B. M. (2009). Designing an optimal turnover-based storage rack for a 3D compact automated storage and retrieval system. *International Journal of Production Research, 47*(6), 1551–1571. <https://doi.org/10.1080/00207540701576346>

Apéndices

Ver apéndices adjuntos

Apéndice A Bitácora de referencias bibliográficas para la revisión de literatura

Apéndice B Experimentación criterio asignación Producto – Posición en la estantería

Apéndice C Ejemplo de aplicación del método heurístico

Apéndice D Código del modelo matemático en Matlab

Apéndice E Experimentación modelo matemático distribución 20-30-50

Apéndice F Experimentación modelo matemático distribución 20-20-60

Apéndice G Artículo científico de carácter publicable