

**Optimización de un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación de doble
plataforma desde la perspectiva del costo y tiempo de operación**

Trabajo de investigación para optar al título de Magister en Ingeniería Industrial

Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento

Director:

Edwin Alberto Garavito Hernández

Magíster en Ingeniería Industrial

Codirectora:

Laura Yeraldín Escobar Rodríguez

Magíster en Ingeniería Industrial

Grupo de Investigación:

Optimización y Organización de Sistemas Productivos, Administrativos y Logísticos

(OPALO)

Universidad Industrial de Santander

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Maestría en Ingeniería Industrial

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mis hermanas Mariana y Catalina.

A mis padres Eduardo y Nancy.

Lo logramos, los amo.

Agradecimientos

A mi familia, por el apoyo incondicional recibido, son el motor de mi vida.

A mi amiga, la profesora Laura Escobar, por guiarme y formarme en cada etapa de este proceso, por ayudarme a crecer personalmente y por afianzar mis propósitos de vida.

Gracias por ser un ejemplo a seguir.

Al profesor Edwin Garavito, por su orientación en mi desarrollo profesional y por su respaldo incondicional en cada paso de mi camino en la maestría.

A mi amiga Danna, por confiar en mis capacidades y por enseñarme a ser mejor cada día.

Gracias por estar siempre a mi lado, eres luz.

A mis amigos Juan David, Paola y Gessica, por su consejo y apoyo en los momentos difíciles, por creer en mí y por alegrar mi vida en cada momento compartido.

Gracias por tanto, los admiro.

Al grupo OPALO y todos sus integrantes, por cada momento de aprendizaje que tuve la oportunidad de vivir.

A ustedes, gracias.

Tabla de contenido

Generalidades del Proyecto.....	13
Título	13
Responsables.....	13
Grupo de Investigación.....	13
Introducción	14
1. Objetivos.....	17
1.1. Objetivo General	17
1.2. Objetivos Específicos	17
2. Proposiciones.....	18
3. Metodología.....	19
3.1. Definición del Problema.....	19
3.2. Formulación de un Modelo Matemático	20
3.3. Obtención de soluciones a partir del modelo	22
3.4. Experimentación a través del Modelo	22
4. Revisión de Literatura	23
4.1. Modelos Analíticos.....	27
4.1.1. Sistemas con Múltiples Pasillos	27
4.1.2. Estantería con Profundidad Doble.....	28
4.1.3. Grúas con Plataforma Múltiple	29

4.1.4. Ubicación de los Puntos de Ingreso y Salida de Material	29
4.1.5. Políticas de Almacenamiento Basado en Clases	31
4.1.6. Ubicación del Punto de Espera.....	32
4.1.7. Demanda Energética como Medida de Desempeño	32
4.2. Modelos de Simulación	33
4.2.1. Sistemas con Múltiples Pasillos	34
4.2.2. Políticas de Almacenamiento Basado en Clases	35
4.2.3. Demanda Energética como Medida de Desempeño	36
4.3. Modelos Matemáticos	36
4.4. Discusión de la Revisión	38
5. Formulación de un Modelo General para la Toma de Decisiones en un AS/RS	40
5.1. Parámetros de Entrada.....	40
5.2. Criterio de Asignación Ítem-pasillo	44
5.2.1. Representación del Sistema a través de un Vector de Priorización.....	46
5.3. Criterio para la Definición del Número de Grúas y la Asignación Grúa – pasillo.....	48
5.3.1. Supuestos del Método.....	49
5.3.2. Definición de las Alternativas de Asignación Considerando el Número de Pasillos del Sistema.	50
5.3.3. Prorrato de las Grúas del Sistema Siguiendo la Alternativa de Asignación y las Priorizaciones de cada Pasillo.....	51

5.3.4. Cálculo del Índice de Ponderación.....	51
5.3.5. Construcción de la Función de Costo.....	52
5.3.6. Ajuste de la Función de Costo.....	53
5.3.7. Elección de la Mejor Alternativa.....	53
5.4. Modelo de Programación Lineal Entera para las Operaciones de Secuenciación y Asignación de Ubicaciones.....	54
5.4.1. Parámetros de Entrada.....	55
5.4.2. Supuestos del Modelo.....	55
5.4.3. Descripción del Modelo Matemático.....	56
6. Obtención de Soluciones a partir del Modelo.....	60
6.1. Análisis de Sensibilidad del Criterio de Asignación Ítem – pasillo.....	60
6.2. Análisis de Sensibilidad del Criterio para la Definición del Número de Grúas y la Asignación Grúa-pasillo.....	63
6.3. Definición de las Instancias Propuestas.....	65
6.4. Verificación Mediante las Instancias Propuestas.....	66
7. Experimentación a través del Modelo.....	67
7.1. Políticas de Secuenciación y Almacenamiento.....	67
7.2. Escenarios y Réplicas.....	67
7.3. Descripción del Experimento y Resultados.....	68
8. Análisis de Resultados.....	73

9. Conclusiones.....	74
10. Referencias	76
Apéndice A. Análisis Bibliométrico	84

Lista de Figuras

Figura 1. Fases metodológicas para la formulación del modelo matemático	19
Figura 2. Metodología para la revisión	20
Figura 3. Estructura del modelo de decisión.....	21
Figura 4. Descripción general de un AS/RS	23
Figura 5. Decisiones para el diseño de un AS/RS (a).....	25
Figura 6. Decisiones para el diseño de un AS/RS (b).....	26
Figura 7. Diseño general del sistema (a).....	43
Figura 8. Diseño general del sistema (b)	43
Figura 9. Estrategias de almacenamiento basado en clases en pasillos no categorizados	45
Figura 10. Prorrateo de las grúas del sistema. Ejemplo.....	51
Figura 11. Impacto del índice de ponderación en el costo total. Ejemplo.....	54
Figura 12. Diagrama de flujo del modelo general para la toma de decisiones.	59
Figura 13. Análisis de sensibilidad criterio ítem - pasillo	61
Figura 14. Sensibilidad del vector de priorización en función del tamaño de las clases	62
Figura 15. Análisis de sensibilidad criterio grúa – pasillo.....	64
Figura 16. Orden de corridas	68
Figura 17. Resultados subsistema 1	70
Figura 18. Resultados subsistema 2	71
Figura 19. Resultados subsistema 3	72
Figura 20. Ecuación de búsqueda	85
Figura 21. Resultados del proceso de búsqueda	85
Figura 22. Análisis de coocurrencias. Validación de resultados.	86
Figura 23. Número de documentos publicados por año	87

Figura 24. Número de citaciones por año 87

Lista de Tablas

Tabla 1. Investigaciones complementarias para la clasificación de AS/RS	24
Tabla 2. Investigaciones con modelos de simulación para la validación de modelos analíticos.	33
Tabla 3. Número de ubicaciones para cada clase ABC. Ejemplo.....	46
Tabla 4. Priorización y ubicaciones en un sistema balanceado. Ejemplo.....	48
Tabla 5. Alternativas de asignación en un sistema con cinco pasillos. Ejemplo.	50
Tabla 6. Índice de ponderación. Ejemplo	52
Tabla 7. Costo total ajustado de las alternativas de asignación. Ejemplo.....	53
Tabla 8. Versión del software y características del equipo de cómputo	60
Tabla 9. Niveles de los factores para el análisis de sensibilidad del vector de priorización	62
Tabla 10. Parámetros e instancias (a)	65
Tabla 11. Parámetros e instancias (b)	66
Tabla 12. Niveles de las políticas de control a evaluar.....	67
Tabla 13. Niveles de los intervalos de experimentación.....	69
Tabla 14. Publicaciones y citas por país	88
Tabla 15. Publicaciones y citas por fuente.....	88
Tabla 16. Publicaciones y citas por autor.....	89

Resumen

Título del proyecto: Optimización de un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación de doble plataforma desde la perspectiva del costo y tiempo de operación *

Autor: Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento **

Palabras claves: Sistema automatizado de almacenamiento y recuperación, AS/RS, Modelo matemático, Modelo de optimización, Gestión de almacenes.

Descripción:

Los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación o AS/RS, se definen como una solución logística para entornos de producción y distribución, en donde un conjunto de estantes es alimentado por grúas automatizadas a través de los pasillos del sistema. Los AS/RS favorecen entornos más seguros y productivos; su implementación, permite la gestión de inventarios a partir de las ordenes de entrada y salida de material optimizando la utilización del espacio físico disponible y los procesos de manipulación de existencias. Múltiples decisiones físicas y de control componen el diseño global de un AS/RS; luego, en busca de mejorar el desempeño del sistema, estas decisiones son abordadas desde diferentes perspectivas, representando los AS/RS a través de múltiples estrategias de modelado.

En este trabajo, se propone un modelo de optimización para un AS/RS con doble plataforma, múltiples pasillos, grúas no dedicadas y almacenamiento basado en clases. El desarrollo del modelo se establece por etapas con el objetivo de abarcar diferentes niveles de decisión, involucrando un criterio de asignación ítem-pasillo, un criterio para la definición del número de grúas y su respectiva asignación y un modelo matemático que optimice las operaciones de secuenciación y almacenamiento. El modelo desarrollado es utilizado como herramienta de experimentación; luego, se evalúan dos políticas de control asociadas con las operaciones definidas por el modelo matemático (tamaño de bloque de secuenciación y tamaño de las clases de almacenamiento). De los resultados, se concluye que solo la política de secuenciación estudiada afecta significativamente el tiempo de ciclo de la grúa, proponiéndose un tamaño de bloque alto para un mejor desempeño del sistema.

* Trabajo de grado.

** Facultad de ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios industriales y Empresariales.

Director: M. Sc. Edwin Alberto Garavito Hernández

Codirectora: M. Sc. Laura Yeraldín Escobar Rodríguez

Abstract

Title: Optimization of a dual-shuttle automated storage and retrieval system from cost operation and travel time perspective *

Author: Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento **

Keywords: Automated Storage and Retrieval System, AS/RS, Mathematical model, Optimization model, Warehouse management.

Description:

Automated storage and retrieval systems (AS/RS) are defined as a logistics solution used in production and distribution environments. These systems consist of sets of racks stocked through automated cranes that move along the aisles of the system. The AS/RS are safer and more productive environments; their implementation allows inventory management based on incoming and outgoing material orders, optimizing the use of available physical space and stock handling processes. Multiple physical and control decisions make up the overall design of an AS/RS; then, to improve the system performance, these decisions are approached from different perspectives, representing the AS/RS through multiple modeling strategies.

This work proposes an optimization model for a dual-shuttle AS/RS with multiple aisles, non-dedicated cranes, and class-based storage. The development of the model is established in stages with the objective of covering different decision levels, involving an item-aisle allocation criterion, a criterion for the definition of the number of cranes and their respective allocation, and a mathematical model that optimizes the sequencing and storage operations. The developed model is used as an experimental tool; then, two control policies associated with the operations defined by the mathematical model are evaluated (sequencing block size and storage class size). From the results, it is concluded that only the sequencing policy significantly affects the crane travel time, proposing a high block size for better system performance.

* Master thesis.

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies.

Advisor: M. Sc. Edwin Alberto Garavito Hernández

Advisor: M. Sc. Laura Yeraldín Escobar Rodríguez

Generalidades del Proyecto

Título

Optimización de un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación de doble plataforma desde la perspectiva del costo y tiempo de operación

Responsables

Nombre autor: Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento

Nombre director: Edwin Alberto Garavito Hernández

Nombre codirectora: Laura Yeraldín Escobar Rodríguez

Grupo de Investigación

Nombre del grupo de investigación: Grupo en Optimización y Organización de Sistemas Productivos, Administrativos y Logísticos – Grupo OPALO.

Nombre director de grupo de investigación: Carlos Eduardo Díaz Bohórquez

Introducción

En los últimos años, con la llegada de la cuarta revolución industrial, la automatización ha cobrado un papel cada vez más relevante en las operaciones poco cualificadas de los diferentes sectores productivos. Según Poquet Catala (2020), junto con la industria manufacturera y el sector salud y de cuidado personal, el sector logístico resulta ser uno de los más impactados por la automatización, influyendo, en este último, en los procesos de manipulación y transferencia de materiales, almacenamiento, y envío de productos. A partir de esto, y considerando las necesidades de las industrias actuales, nuevas soluciones logísticas son requeridas en busca de satisfacer los requerimientos del mercado y, asimismo, incrementar la competitividad de las empresas. Bajo este contexto, hoy en día, los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación resultan importantes en las industrias, cubriendo las nuevas necesidades requeridas por el sector e implementando tecnologías de la industria 4.0.

Los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación, conocidos como AS/RS, son una solución logística utilizada en entornos de producción y distribución. Consisten en conjuntos de estantes que son alimentados por grúas automatizadas que se desplazan a lo largo de los pasillos del sistema. Los AS/RS se complementan con sistemas de gestión de almacenes y aprovechan las tecnologías de la industria 4.0 para crear entornos más seguros y productivos. La implementación de un AS/RS permite una gestión eficiente de los inventarios a través de la generación de órdenes de almacenamiento y recuperación. Esto, optimiza la utilización del espacio físico disponible y mejora los procesos de manipulación de materiales. Además, se beneficia el rendimiento del sistema en términos de los tiempos de almacenamiento y recuperación, el flujo de materiales, el consumo de energía, los costos de operación y otras medidas de desempeño asociadas.

El diseño global de un AS/RS se compone de múltiples decisiones físicas y de control. Estas decisiones abarcan aspectos como el tipo de tecnología del sistema, el número de pasillos, el tamaño de los estantes, los puntos de entrada y salida de material, las políticas de almacenamiento y secuenciación, entre otros. Si bien los AS/RS tradicionales han sido ampliamente estudiados por diversos investigadores, es necesario incorporar nuevas características en el análisis de estos sistemas, ya que reflejan los requerimientos de las industrias en sistemas específicos y complejos de gestionar (Roodbergen & Vis, 2009).

Desde esta perspectiva, en los últimos años se han propuesto estudios de sistemas no tradicionales en los que se incorporan elementos como múltiples pasillos, estanterías con múltiple profundidad, grúas con múltiples plataformas, entre otros. Además, se han desarrollado diversas metodologías para el análisis de las operaciones de estos sistemas; diferentes estrategias de modelado han sido propuestas por los tomadores de decisiones buscando mejorar el rendimiento de los AS/RS a través de las decisiones de diseño y control.

A partir de lo anterior, la presente investigación propone desarrollar un modelo de optimización para un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación de doble plataforma, abordado desde la perspectiva del tiempo y costo de operación, e involucrando otros elementos de diseño y control, tales como múltiples pasillos, grúas no dedicadas y almacenamiento basado en clases. Este trabajo permitirá aportar al dominio de conocimiento actual desde el punto de vista teórico y metodológico, considerando decisiones asociadas con:

- La asignación ítem – pasillo en AS/RS con almacenamiento basado en clases.
- La definición del número de grúas y asignación grúa – pasillo en AS/RS con grúas no dedicadas, involucrando priorización de pasillos.

- La secuenciación y asignación de ubicaciones en un AS/RS de doble plataforma y unidad de carga a partir de un modelo matemático.
- La definición de una estructura que permita integrar los 3 elementos previos.

Finalmente, desde la pertinencia práctica, el modelo propuesto podrá ser implementado como herramienta de experimentación de diferentes políticas de control, favoreciendo la toma de estas decisiones en entornos industriales reales que consideren sistemas similares, o iguales al estudiado.

La estructura de este documento se describe a continuación. Las secciones 1 y 2 definen los objetivos y las proposiciones a analizar. La sección 3 da respuesta a la metodología propuesta para la consecución de los objetivos. En la sección 4 se presenta la revisión de literatura realizada sobre el tema de investigación. La sección 5 describe la formulación del modelo general propuesto. La sección 6 detalla un análisis de sensibilidad de las etapas del modelo. La experimentación y el análisis de resultados se detalla en las secciones 7 y 8; mientras que, la sección 9 y 10 presentan, en ese orden, las conclusiones generadas y las referencias bibliográficas consideradas durante el documento.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Formular un modelo de optimización para un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación (AS/RS) de doble plataforma desde la perspectiva del costo y tiempo de operación.

1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el problema de investigación a partir de una revisión de literatura, definiendo la estrategia de modelado a implementar y el sistema objeto de estudio.
- Desarrollar un modelo de optimización para la secuenciación y asignación de ubicaciones de un AS/RS de doble plataforma, involucrando grúas no dedicadas y priorización de pasillos.
- Aplicar el modelo propuesto como instrumento de experimentación, evaluando diferentes políticas de secuenciación y almacenamiento desde el costo y tiempo de operación.

2. Propositiones

La presente investigación considera las siguientes proposiciones:





- Los modelos de programación matemática resultan adecuados para la toma de decisiones en las operaciones de secuenciación y asignación de ubicaciones de los AS/RS no tradicionales.
- Los cambios de políticas de almacenamiento y secuenciación mejoran el desempeño de los AS/RS con unidad de carga, doble plataforma, múltiples pasillos y grúas no dedicadas.

3. Metodología

Tomando como referencia la metodología planteada por Hillier & Lieberman (2010) para estudios de investigación de operaciones; a continuación, se detallan las fases metodológicas propuestas para la presente investigación (ver Figura 1).

Figura 1.

Fases metodológicas para la formulación del modelo matemático

1 – Definición del problema	
2 – Formulación de un modelo matemático	
3 – Obtención de soluciones a partir del modelo	
4 – Experimentación a través del modelo	

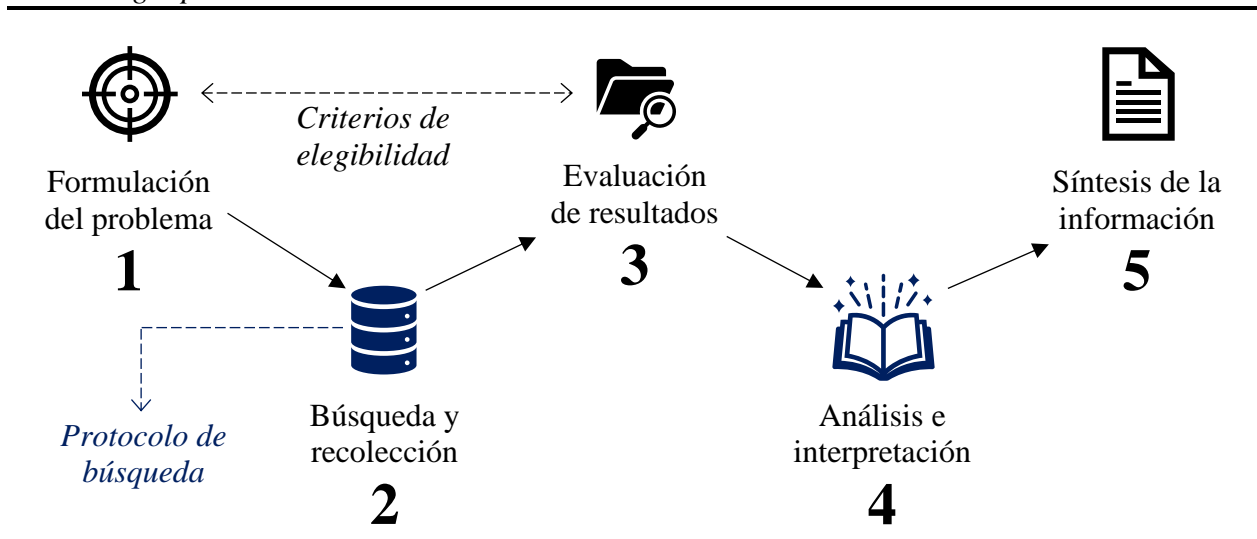
3.1. Definición del Problema

En esta primera fase se establecen los componentes y la estructura de los AS/RS a partir de una revisión de literatura, adaptando la metodología propuesta por Randolph (2009). De la revisión, se busca identificar las estrategias de modelado bajo las cuales estos sistemas son estudiados, definiendo las decisiones de diseño y control que consideran y las principales medidas de desempeño. La Figura 2 describe la metodología utilizada para la revisión.

Luego de establecer todos los elementos que componen estos sistemas, y considerando los diferentes modelos descritos en literatura, se definen las características del sistema objeto de estudio de la presente investigación, al igual que la estrategia de modelado a implementar. Así pues, se precisan los materiales necesarios para la construcción del modelo matemático, además

de las políticas de control que permitan evaluar el desempeño del sistema por medio del uso del modelo.

Figura 2.
Metodología para la revisión



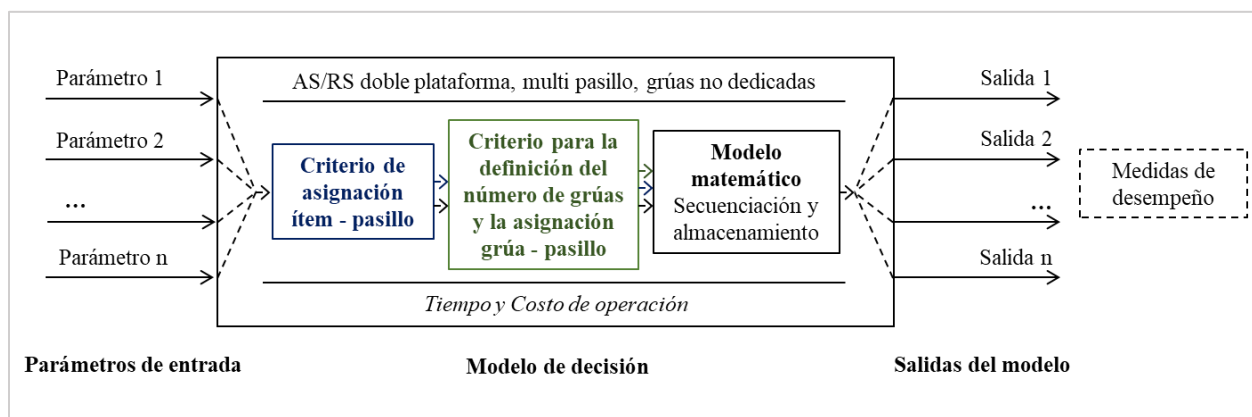
3.2. Formulación de un Modelo Matemático

A partir de lo encontrado en la fase anterior, se construye un modelo matemático que permita representar las operaciones de secuenciación y asignación de ubicaciones. Sin embargo, debido a las múltiples decisiones que comprenden estos sistemas, el modelo propuesto se considera parte de un modelo general para la toma de decisiones, ya que requiere de etapas anteriores para definir sus insumos y establecerse dentro del contexto del problema.

Siguiendo la estructura del modelo de decisión (ver Figura 3), el modelo matemático se alimenta de las salidas de las etapas previas y de los parámetros de entrada definidos. Con base en esto, es necesario establecer en primera medida:

- **Parámetros de entrada:** Los cuales, a partir de sus niveles, definirán las instancias con las que se verificará el modelo propuesto.

- Criterio de asignación ítem – pasillo: De lo disponible en literatura, se propone desarrollar un criterio que defina el pasillo en el que cada ítem debe ser almacenado.
- Criterio para la definición del número de grúas y la asignación grúa – pasillo: Partiendo del sistema objeto de estudio, se plantea construir un método que favorezca estas decisiones de diseño y control desde la perspectiva del costo.

Figura 3.*Estructura del modelo de decisión*

Una vez estas etapas son definidas, se da paso a la formulación del modelo matemático, definiendo:

- **Variables de decisión:** Variables binarias relacionadas con las operaciones de almacenamiento y secuenciación (ruta de la grúa).
- **Función objetivo:** Involucra el tiempo de operación requerido por la grúa para satisfacer los ciclos de almacenamiento y recuperación del sistema.
- **Conjunto de restricciones:** Describen los supuestos del sistema ligados a la política de secuenciación, política de almacenamiento, capacidad de la grúa, entre otros.

Las salidas del modelo se definen a partir de las variables de decisión de cada una de las etapas, permitiendo el cálculo de indicadores, los cuales, favorecen la medición del desempeño del sistema.

3.3. Obtención de soluciones a partir del modelo

Para solucionar el problema en estudio, es necesario codificar las diferentes etapas del modelo de decisión, luego, resulta conveniente seleccionar un software que permita integrar los criterios ya mencionados con un algoritmo computacional que dé solución al modelo matemático. Por lo anterior, haciendo uso de la licencia *Campus Agreement* con la que cuenta la Universidad Industrial de Santander, se selecciona el software Matlab¹ como entorno de solución.

Finalmente, además de la codificación del modelo propuesto, esta fase involucra la definición de instancias a partir de los parámetros de entrada identificados en literatura. Una vez estas son establecidas, cada una de las etapas del modelo es codificada y puesta a prueba para su verificación.

3.4. Experimentación a través del Modelo

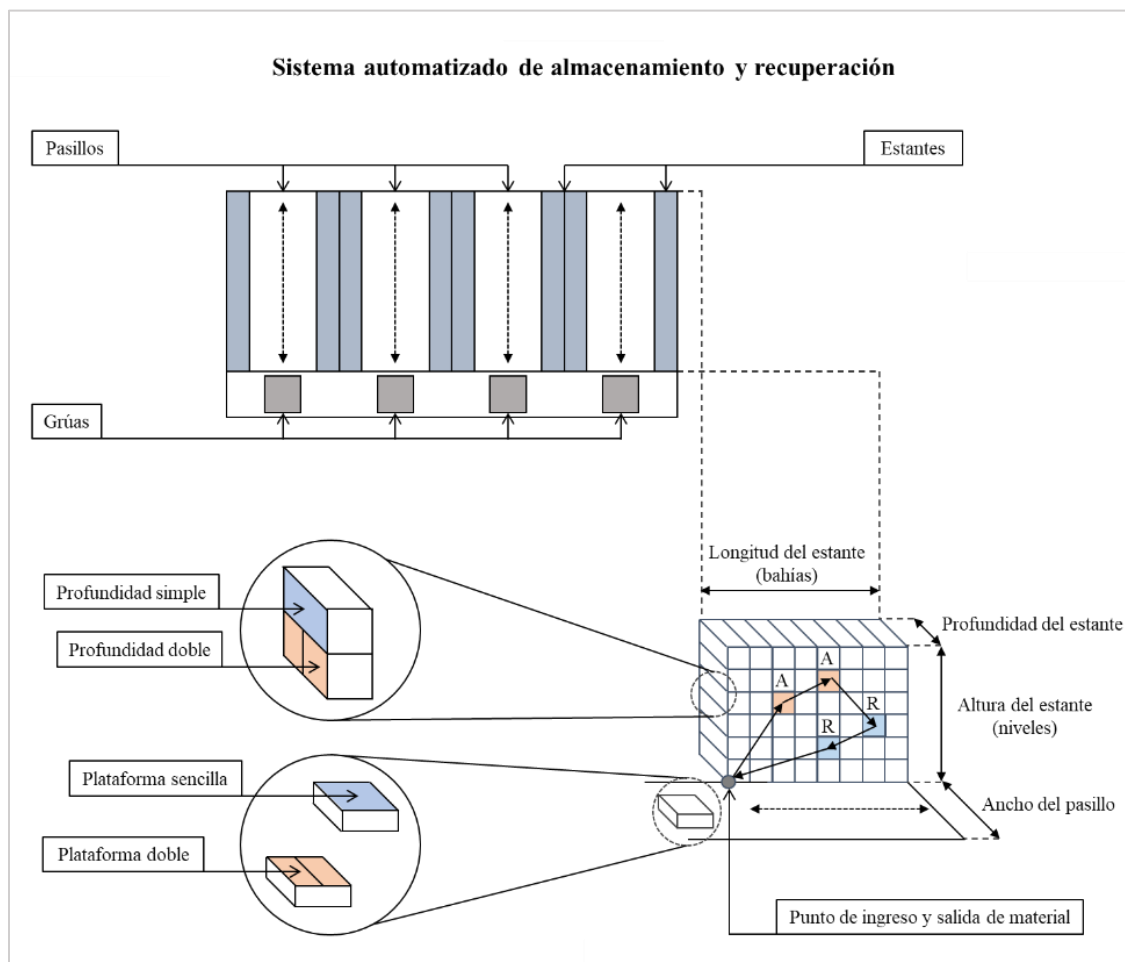
Realizadas las fases anteriores, se propone evaluar el tiempo de operación de algunas de las políticas de secuenciación y almacenamiento dispuestas en literatura, siendo este el criterio de optimización del modelo propuesto, permitiendo establecer las mejores configuraciones de estas operaciones para el sistema objeto de estudio y concluyendo en función de las proposiciones dispuestas en la presente investigación.

¹ Software matemático comercial que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Desarrollado por Mathworks y Cleve Moler. Última versión disponible: R2023a.

4. Revisión de Literatura

Los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación surgen de la necesidad de implementar sistemas de manipulación de materiales más productivos, eficientes y seguros, convirtiéndose en una solución apropiada para la gestión de almacenes en entornos logísticos y de producción. La Figura 4 describe a nivel general algunos de los elementos que componen estos sistemas. Un análisis bibliométrico de la literatura asociada al problema de investigación es presentado en el Apéndice A; confirmando el interés de la comunidad científica en torno a este tópico e identificando los principales autores, países y fuentes de información desde dos métricas principales, publicaciones y citas recibidas.

Figura 4.
Descripción general de un AS/RS



Debido a sus características de operación, los AS/RS se estructuran a partir de múltiples decisiones de diseño y control, las cuales permiten su adaptación a problemas y necesidades particulares. Dichas decisiones, establecen el tipo de sistema y su configuración física, al igual que sus políticas de operación, relacionadas con las tareas de almacenamiento y secuenciación, puntos de espera, entre otros elementos. En su investigación, Roodbergen & Vis (2009) describen detalladamente los diferentes tipos de AS/RS que pueden ser definidos a partir de estas decisiones; la Figura 5 y la Figura 6 muestran una versión ampliada de esta clasificación, complementada a partir de algunas investigaciones que consideran otros elementos del sistema (Ver Tabla 1).

Tabla 1.

Investigaciones complementarias para la clasificación de AS/RS

<i>Investigación</i>	<i>Categoría</i>	<i>Elemento</i>
Ru (2016)	Tamaño de las ubicaciones de almacenamiento	Posiciones irregulares
Ertl & Günthner (2016)		
Hahn-Woernle & Günthner (2018)	Medida de desempeño	Consumo de energía
Rücker et al. (2020)		
Bortolini et al. (2017)	Medida de desempeño	Tiempo de operación y consumo de energía
Meneghetti et al. (2015)		Costo de operación, consumo de energía y emisiones
Roozbeh Nia et al. (2017)	Medida de desempeño	Inversión, tiempo de operación y emisiones
Rajković et al. (2019)	Medida de desempeño	Costo de instalación y operación
Alnahhal et al. (2022)	Medida de desempeño	
Boysen et al. (2018)		
Gagliardi et al. (2014b)	Método de secuenciación	Programación lineal
Tanaka & Araki (2009)		
Wauters et al. (2016)		
Chen et al. (2020)	Decisiones de control	Puntos muertos y colisiones
Dotoli & Fanti (2007)		

Figura 5.*Decisiones para el diseño de un AS/RS (a)***Diseño de un AS/RS – Decisiones de diseño**

1. Elección del sistema

Grúas

Movimiento

Pasillos dedicados (cada grúa atiende un único pasillo) **

Pasillos cambiantes (una grúa atiende varios pasillos)

Plataforma

Sencilla**

Doble

Múltiples

Manipulación del material

Picking

Persona a bordo

Al final del pasillo (Miniload)

Unidad de carga **

Tipo de carga

Pallets **

Contenedores

Tipo de estante

Estantes estacionarios

Profundidad simple **

Profundidad doble

Estantes móviles

En rieles

Tipo carrusel (horizontal simple, horizontal doble, vertical)

2. Configuración del sistema

Número de pasillos

Uno **

Múltiples

Tamaño del Estante

Cuadrado en función del tiempo**

Rectangular

Número de grúasTamaño de las ubicaciones de almacenamiento

Regulares **

Irregulares *

Puntos de ingreso y salida de material

Número

Uno **

Múltiples

Tipo

Consolidado* *

Independientes

Ubicación

Capacidad del buffer

↑↓ **Medidas de desempeño** Tiempo de operación ** Costo de operación* Emisiones*
Consumo de energía * Inversión*

Nota. *Categorías complementarias a la clasificación propuesta por *Roodbergen & Vis (2009)*.

**Características del problema base en el estudio de los AS/RS. Sistema tradicional.

Figura 6.*Decisiones para el diseño de un AS/RS (b)***Diseño de un AS/RS – Decisiones de control**

1. 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

2. Batching
 - Tipo
 - Estático
 - Dinámico
 - Tamaño del lote
 - Basado en tiempo
 - Basado en capacidad
 - Selección de política de asignación de las órdenes en los lotes

3. Secuencia de picking (Almacenamiento/Recuperación)
 - 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 (Recuperación) **
 - Menor tiempo de finalización (Recuperación)
 - Vecino más cercano (Almacenamiento/Recuperación)
 - Menor distancia extra (Almacenamiento)
 - Problema del agente viajero asimétrico (Almacenamiento/Recuperación)
 - Métodos exactos
 - Programación lineal*

4. Punto 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

5. Puntos muertos y colisiones
 - Métodos de prevención (online y offline) *
 - Métodos de detección y recuperación *

Nota. *Categorías complementarias a la clasificación propuesta por Roodbergen & Vis (2009).

**Características del problema base en el estudio de los AS/RS. Sistema tradicional.

A partir de lo anterior, y considerando que el estudio de estos sistemas tiene como objetivo mejorar su desempeño, se encuentran diferentes perspectivas de modelado en literatura. En su trabajo, Gagliardi et al. (2012a) describen dos enfoques para la evaluación de los AS/RS: los modelos analíticos y los modelos de simulación. Estas estrategias describen el comportamiento del sistema, lo que permite someterlo a diferentes decisiones de diseño y control, y determinar aquellas que favorezcan su operación desde alguna medida de desempeño particular. Por otra parte, otros autores proponen mejorar el sistema desde un enfoque matemático, desarrollando modelos de programación matemática para la toma de decisiones sobre sus operaciones. A continuación, se describen estas tres perspectivas de modelado y cómo han sido involucradas en diferentes estudios.

4.1. Modelos Analíticos

Este paradigma permite abordar preguntas concretas del sistema, describiendo su comportamiento en estado estacionario mediante un análisis matemático. Los modelos analíticos son principalmente utilizados para el estudio de los tiempos de ciclo, representando los estantes como discretos (empíricos) o continuos (normalizados) a partir del enfoque del autor (Gagliardi et al., 2012a). Con base en las decisiones de diseño y control que consideran, los modelos analíticos propuestos en los últimos 10 años han abordado las características descritas en las siguientes secciones.

4.1.1. Sistemas con Múltiples Pasillos

Cuando un sistema considera múltiples pasillos, los elementos de diseño asociados a las dimensiones de la estantería toman una importancia particular; lo anterior, asociado a la utilización del espacio físico disponible y a cómo estas decisiones pueden afectar la operación global del sistema. En su investigación, Kouloughli & Sari (2015) proponen un modelo analítico para el tiempo de ciclo de un AS/RS con múltiples pasillos. Considerando tres tipos de desplazamiento,

vertical, horizontal y entre pasillos, a través del modelo propuesto definen las dimensiones óptimas de los estantes analizando su efecto en el rendimiento general del sistema.

4.1.2. Estantería con Profundidad Doble

Cuando los estantes del sistema disponen de profundidad doble, algunas tareas de recuperación se ven afectadas por la necesidad de reubicar material. Considerar estos tipos de estanterías (generalmente discretas) obligan al analista a evaluar políticas de reubicación que favorezcan la operación del AS/RS.

En su estudio, Wu et al. (2013) desarrollan un modelo para calcular la distancia total recorrida por la grúa en tareas de recuperación. Su propuesta es flexible a comandos múltiples de alistamiento de pedidos o “*Picking*”, además de que establece un análisis matemático para considerar el proceso de reubicación de material al lugar disponible más cercano.

Por otra parte, Xu et al. (2015) desarrollan un modelo para la evaluación del tiempo de ciclo en un sistema con doble plataforma, proponiendo dos estrategias de reubicación, una a través de la capacidad de la grúa y otra mediante la estantería operando al lugar más cercano. De su análisis, concluyen que la operación de un sistema con este tipo de grúa resulta más eficiente en comparación con un sistema tradicional. Así mismo, Xu et al. (2016) evalúan tres políticas de reubicación en un sistema multi-pasillo con almacenamiento aleatorio. Como resultado, se obtiene que el tiempo de ciclo del sistema resulta menor cuando la reubicación se realiza al lugar más cercano y se consideran ciclos dobles de secuenciación, superando el desempeño de las políticas de reubicación fija y aleatoria.

En adición, otros autores han estudiado la operación de reubicación desde una perspectiva probabilística. En su investigación, Lehmann & Hußmann (2021) desarrollan un modelo analítico que considera almacenamiento aleatorio y secuenciación bajo comandos simples y dobles. El

modelo propuesto permite determinar el número esperado de reubicaciones, los tiempos de ciclo y la probabilidad de reubicación de los elementos del sistema, además de que fácilmente puede ser adaptado a sistemas con estantería de múltiple profundidad (más de dos). No obstante, incrementar la profundidad de los estantes a esta categoría transforma la concepción de los AS/RS selectivos, ya que por sus características, estos sistemas se asemejan más a otro tipo de soluciones logísticas, como los Flow racks o los sistemas de almacenamiento 3D (Xu et al., 2019).

4.1.3. Grúas con Plataforma Múltiple

Los AS/RS que involucran esta característica resultan ser más eficientes que aquellos cuyas grúas tienen única plataforma. Múltiples modelos analíticos, enfocados al tiempo de ciclo, han sido propuestos para estudiar estos sistemas (Azzi et al., 2011; Lerher et al., 2011; Malmborg, 2000; Meller & Mungwattana, 1997); sin embargo, en los últimos años, otros autores han enfocado sus esfuerzos en ajustar modelos previamente desarrollados. En su trabajo, Schenone et al. (2019) proponen una nueva versión del modelo propuesto por Meller & Mungwattana (1997), en donde consideran a la constante del término *travel between times (TB)* como un coeficiente que depende de la configuración del estante y de los puntos de ingreso y salida de material. Esta propuesta permite un cálculo más preciso de los tiempos de ciclo, lo cual resulta favorable para el diseño y la gestión del almacén.

4.1.4. Ubicación de los Puntos de Ingreso y Salida de Material

Esta decisión de diseño fue abordada anteriormente por Randhawa et al. (1991) para sistemas tradicionales; no obstante, otras perspectivas han sido propuestas en busca de evaluar su influencia en sistemas más complejos. Ramtin & Pazour (2014) desarrollan un modelo para el cálculo del tiempo de ciclo en un sistema con múltiples puntos de salida de material ubicados al interior del pasillo. Con su propuesta, evalúan dos políticas de programación de operaciones

(almacenamiento y recuperación) y su relación con la configuración física del estante. A partir de los resultados, se obtiene que operar estos sistemas bajo comandos dobles de secuenciación resulta ideal; sin embargo, en caso de que ejecutar esta política no sea posible, comandos simples de operación no afectan significativamente el desempeño del sistema, siempre y cuando todas las tareas de recuperación se realicen primero que las tareas de almacenamiento.

En su investigación, Chen et al. (2020) proponen un modelo analítico para un sistema con dos grúas por pasillo, con el cual, evalúan dos posibles ubicaciones para los dos puntos de ingreso y salida de material, uno para cada grúa. El sistema estudiado resulta interesante desde la perspectiva de asignación de tareas y la definición de estrategias para evitar colisiones en el proceso de *Picking*, midiendo su desempeño mediante el tiempo de ciclo, los tiempos de espera y la tasa de utilización de las grúas. De la experimentación, se define que, desde el tiempo de ciclo y a pesar de que existe mayor probabilidad de colisiones, la ubicación ideal de ambos puntos resulta en el medio del pasillo, uno frente al otro.

Por otra parte, algunos autores evalúan el efecto en el desempeño del sistema de esta decisión en conjunto con otras decisiones de operación. Es el caso de Alnahhal & Salah (2022), quienes desde la perspectiva del tiempo de ciclo y el flujo de material, proponen un modelo analítico para estudiar un sistema con almacenamiento basado en clases en donde se ejecute un proceso de reubicación en función de dos alternativas de punto de ingreso y salida de material. De la comparación de estos escenarios, se evidencia que las medidas de desempeño pueden ser mejoradas bajo ciertas configuraciones de algunos parámetros del sistema, tales como el número de órdenes o comandos por ejecutar, y la altura de la estantería.

Finalmente, algunos autores proponen sus modelos analíticos a partir de otras metodologías de análisis. Hoshimov et al. (2022) desarrollan un modelo para el cálculo del tiempo de ciclo en

un sistema con almacenamiento basado en clases y múltiples comandos de secuenciación. El modelo propuesto resulta de un modelo de regresión lineal múltiple, en donde se consideran como variables predictoras la posición del punto de ingreso y salida de material, el factor de forma del estante, los ítems pertenecientes a cada clase y sus respectivas tasas de rotación.

4.1.5. Políticas de Almacenamiento Basado en Clases

Generalmente, las políticas de almacenamiento no son evaluadas en enfoques analíticos, ya que son involucradas como supuestos del sistema. Por ello, es importante resaltar las investigaciones propuestas por Gamberi et al. (2012), Bortolini et al. (2015) y Ouhoud et al. (2016) quienes desarrollan modelos analíticos para evaluar desde el tiempo de ciclo el almacenamiento basado en clases (ABC) en los AS/RS.

En Gamberi et al. (2012), los autores proporcionan un método para la evaluación del sistema bajo comandos simples y dobles de secuenciación, punto de ingreso y salida de material consolidado y variación de la curva ABC. Considerando un estante normalizado, los productos son clasificados a partir del comportamiento de su demanda, siendo ubicados aleatoriamente dentro del área de cada clase. Esta investigación, proporciona la semilla para el estudio de la relación entre las políticas de almacenamiento y la ejecución de comandos múltiples en el sistema.

Así mismo, en Bortolini et al. (2015) los autores comparan diferentes configuraciones de un sistema que considera comandos simples y dobles de secuenciación desde el tamaño del estante, el tamaño de las clases y la curva ABC. Luego de un análisis de sensibilidad de los elementos estudiados, los resultados determinan que el almacenamiento basado en clases mejora el desempeño del sistema en contraste con el almacenamiento aleatorio, alcanzando un tiempo de ciclo promedio 75% menor bajo ciertas condiciones.

Por su parte, Ouhoud et al. (2016) partiendo de un sistema con múltiples pasillos, una única grúa y comandos simples de operación, proponen dos modelos analíticos para dos políticas de almacenamiento, aleatorio y basado en clases. De la experimentación, partiendo de un estante discreto, se encuentra que ambos modelos describen adecuadamente el sistema, además de que el almacenamiento basado en clases genera menores tiempos de ciclo.

4.1.6. Ubicación del Punto de Espera

Esta decisión de control ha sido abordada previamente desde múltiples modelos de optimización (Chang & Egbelu, 1997; Park, 1999, 2001); sin embargo, al aumentar la complejidad de los sistemas, otras estrategias de modelado resultan necesarias. En su investigación, Regattieri et al. (2013) proponen un modelo analítico para un sistema con grúas en pasillos dedicados, estantería discreta, único punto de ingreso y salida de material (consolidado o distribuido) y almacenamiento aleatorio. Desde la perspectiva del tiempo y la distancia de ciclo, proponen medir el impacto de la ubicación del punto de espera en el sistema. Las políticas propuestas por Bozer & White (1984) son evaluadas a través del modelo, el cual considera tiempo normal entre órdenes y comandos simples y dobles de secuenciación. De la experimentación, se define a la política de *punto medio del estante* como la más interesante desde el tiempo de ciclo, además de la política de *última ubicación*, la cual resalta desde ambas métricas.

4.1.7. Demanda Energética como Medida de Desempeño

Desde la perspectiva analítica, Ertl & Günthner (2016) proponen por primera vez un modelo para el cálculo del consumo energético de las grúas en un AS/RS. A partir de esta investigación, otros autores involucran esta medida de desempeño para la evaluación de sus sistemas. Es el caso de Hahn-Woernle & Günthner (2018), quienes a través del modelo ya mencionado estudian sistemas con múltiples pasillos, o Rücker et al. (2020) quienes proponen dos

modelos analíticos para contrastar el desarrollado por la Federación Europea de Manejo de Materiales (FEM), definiendo que, este último, ofrece resultados más precisos.

4.2. Modelos de Simulación

En el mundo real, los AS/RS pueden ser demasiado complejos para ser evaluados únicamente desde un enfoque analítico, por ello, los modelos de simulación son una buena alternativa para el estudio de estos sistemas y sus elementos estocásticos (Gagliardi et al., 2012a). Debido a que representan de forma adecuada la operación real del sistema, múltiples autores desarrollan estos modelos para validar sus propuestas analíticas. La Tabla 2 describe algunos de los estudios previamente mencionados que consideran modelos de simulación como estrategia de validación.

Tabla 2.

Investigaciones con modelos de simulación para la validación de modelos analíticos

<i>Investigación</i>	<i>Tipo de simulación</i>
Ouhoud et al. (2016), Ramtin & Pazour (2014), Xu et al. (2016), Xu et al. (2019)	Simulación de eventos discretos
Gamberi et al.(2012), Lehmann & Hußmann (2021), Regattieri et al. (2013), Schenone et al. (2019)	Simulación numérica
Chen et al. (2020)	Simulación de sistemas dinámicos

Sin embargo, no solo los modelos analíticos son susceptibles a esta perspectiva, ya que otros autores también la implementan en algoritmos de optimización. Gao & Lu (2016) validan a través de simulación numérica su algoritmo *en línea* para la minimización del tiempo de ciclo en un sistema con una o dos grúas por pasillo; mientras que Barbato et al. (2019) proponen un modelo que combina simulación de eventos discretos y simulación basada en agentes para validar su algoritmo de programación de operaciones en un sistema con dos puntos consolidados de ingreso y salida de material, estantería de doble profundidad y grúa con doble plataforma.

Al igual que la perspectiva analítica, estos modelos permiten evaluar diferentes decisiones de diseño y control, siendo implementados por diversos estudios dentro de su estrategia de modelado. A continuación, se describen las investigaciones relacionadas de los últimos 10 años clasificadas a partir del tema principal estudiado.

4.2.1. Sistemas con Múltiples Pasillos

Desde esta perspectiva de modelado, resaltan las investigaciones de Gagliardi et al. (2014a, 2015) quienes proponen metodologías para la evaluación de estos sistemas considerando diferentes decisiones de diseño y control. En Gagliardi et al. (2014a), a través de simulación de eventos discretos, ejecutan un marco de trabajo para evaluar los AS/RS con múltiples pasillos. El modelo de simulación propuesto permite un análisis preliminar de estos sistemas, además de que se adapta fácilmente a otras configuraciones no tradicionales, como, por ejemplo, sistemas con grúas no dedicadas o sistemas con estantería de doble profundidad. Por su parte, en Gagliardi et al. (2015), se estudia la operación de secuenciación en estos sistemas desde dos perspectivas, una independiente y una global. En la independiente, cada uno de los pasillos es considerado como un sistema individual; mientras que, en la global, todos los pasillos representan un solo sistema. Mediante simulación de eventos discretos, demuestran que un AS/RS con múltiples pasillos no puede representarse de forma precisa por múltiples sistemas individuales.

Otros autores hacen énfasis en el posible efecto de esta configuración sobre el desempeño global del sistema. Esta perspectiva es abordada por Hahn-Woernle & Günthner (2018) quienes evalúan la relación entre el flujo de material y la demanda de energía requerida, partiendo del supuesto de que esta última, en AS/RS con múltiples pasillos, es volátil y considera picos incontrolados en su comportamiento. A través de su modelo de simulación, los autores concluyen

que las políticas de *limitación máxima y media de energía* evitan la existencia de picos de consumo generando solo una ligera pérdida en el rendimiento del sistema.

4.2.2. Políticas de Almacenamiento Basado en Clases

Esta política de almacenamiento ha sido objeto de estudio de múltiples autores en el transcurso de los años, siendo ampliamente analizada a través de modelos de simulación (Hsieh & Tsai, 2001; Kulturel et al., 1999; Lerher, 2006; Moon & Kim, 2001; Van Den Berg & Gademann, 2000). En general, se concluye que considerar almacenamiento basado en clases resulta ideal para el desempeño del sistema; sin embargo, este supuesto está fuertemente relacionado a la propia configuración del AS/RS. Por lo anterior, nuevas investigaciones han sido desarrolladas para estudiar esta política de almacenamiento, implementando diferentes enfoques de simulación.

En Gagliardi et al. (2012b) proponen un modelo de simulación de eventos discretos con el objetivo de reproducir un sistema de un caso de estudio y someterlo a tres políticas de almacenamiento: aleatorio, basado en clases y basado en la frecuencia de salida. De los resultados, se define que, a partir de la configuración del sistema estudiado, las políticas de almacenamiento aleatorio y basado en clases demuestran tener un mejor desempeño desde la perspectiva del tiempo de ciclo. Por su parte, Chatchawan & Kittithreerapronchai (2017) estudian un sistema con *Picking* al final del pasillo considerando varias políticas de almacenamiento, batching y reglas de secuenciación. Por medio de simulación de eventos discretos, evalúan seis escenarios diferentes dados por la combinación de los niveles de cada política, obteniendo que las mejores configuraciones involucran almacenamiento basado en clases.

Siguiendo los resultados expuestos en literatura, algunos autores optan por definir este tipo de almacenamiento como política del sistema, estudiando otros elementos que puedan afectar su desempeño. Es el caso de Salah et al. (2022) quienes ejecutan a través de simulación numérica un

algoritmo de dos pasos para la reubicación de material dentro de la estantería del sistema, con el objetivo de reducir el tiempo total de recuperación.

No obstante, a pesar del buen rendimiento de esta política, nuevas perspectivas de almacenamiento son estudiadas buscando mejorar las operaciones del sistema. Lo anterior se demuestra en Antomarioni et al. (2021) quienes basados en el gran volumen de datos que generan los AS/RS, implementan a través de simulación numérica una regla de asociación entre productos que define su almacenamiento, relacionándolos en pares a partir de sus similitudes en órdenes históricas.

4.2.3. Demanda Energética como Medida de Desempeño

Además de la evaluación de los modelos analíticos propuestos, Rücker et al. (2020) estudian a través de simulación a gran escala el efecto de algunos parámetros del sistema sobre el flujo de material y el consumo energético de la grúa. Mediante un análisis de correlación de los resultados, se define que, para sistemas con unidad de carga, la altura del estante resulta significativa en ambas medidas de desempeño; mientras que, en sistemas miniload, la eficiencia del manejo del material y la longitud del estante, afectan respectivamente el consumo energético y el flujo de material.

4.3. Modelos Matemáticos

Esta estrategia favorece la toma de decisiones a partir de modelos de optimización, los cuales definen la operación del sistema para lograr su mejor desempeño. En particular, esta perspectiva ha sido utilizada para estudiar el proceso de secuenciación y la ubicación del punto de espera en sistemas tradicionales (Chang & Egbelu, 1997; Park, 1999, 2001; Tanaka & Araki, 2009); no obstante, otras decisiones y otros tipos de sistemas han sido abordados por diferentes autores en los últimos años.

Ru (2016) desarrolla un modelo de optimización para un sistema con estantería irregular, evaluado desde la asignación de ubicaciones y la utilización de espacio. Gagliardi et al. (2014b), Yang et al.(2015), Wauters et al. (2016) y Boysen et al. (2018) proponen modelos de programación lineal (PL) para definir la secuencia óptima de operación en función del tiempo de ciclo total del sistema. En Gagliardi et al. (2014b) y Yang et al.(2015), además de la secuenciación, los modelos definen la asignación de las ubicaciones de almacenamiento en sistemas con un único pasillo, comandos múltiples de operación, almacenamiento aleatorio y grúas con única y múltiple plataforma, respectivamente. Wauters et al. (2016) proponen un modelo para un sistema miniload con doble plataforma, almacenamiento aleatorio y comandos simples de secuenciación; mientras que, Boysen et al. (2018) desarrollan un modelo enfocado a las operaciones de recuperación de un sistema con *Picking* al final del pasillo y grúa de única capacidad.

Otros autores postulan sus modelos teniendo en cuenta otras medidas de desempeño. Meneghetti et al. (2015) proponen un modelo híbrido de programación con restricciones para las tareas de secuenciación y asignación de ubicaciones. Con su modelo, evalúan desde el tiempo de ciclo y el consumo de energía el efecto del tamaño del estante en el desempeño del sistema. Xu et al. (2016) además del modelo analítico propuesto para sistemas de doble profundidad, desarrollan un modelo de programación no lineal para determinar el factor de ocupación óptimo en función del costo total de operación. Roozbeh Nia et al. (2017) consideran en su modelo de PL los tiempos de operación, el consumo de energía y la producción de emisiones desde la perspectiva del costo. A través de su modelo optimizan las operaciones del sistema, involucrando secuenciación dinámica y comandos dobles de operación.

De igual forma, Bortolini et al. (2017) desarrollan un modelo de optimización bi-objetivo para el análisis de la asignación de ubicaciones en un sistema con grúas dedicadas, estantería

tradicional y comandos simples de secuenciación, abordado desde la perspectiva del tiempo de ciclo y la demanda energética. Rajković et al. (2019) proponen un modelo de programación no lineal multiobjetivo para minimizar los tiempos de operación, la producción de emisiones y los gastos de inversión. Con su propuesta, favorecen la toma de decisiones en la definición de las características de diseño y operación de los AS/RS. Finalmente, Alnahhal et al. (2022) optimizan a través de un modelo de programación no lineal un sistema que considera flujo de material entre dos estantes con diferentes unidades de carga. Desde la perspectiva del costo de instalación y operación, e involucrando clasificación ABC, establecen la mejor estrategia de transferencia para cada una de las clases, definiendo a partir de esta decisión el flujo total de material, la cantidad de grúas del sistema y la capacidad total de los estantes.

4.4. Discusión de la Revisión

A partir de la revisión realizada, la presente investigación se define considerando los siguientes elementos:

- Decisiones de diseño: En general, resaltan las investigaciones de sistemas no tradicionales, las cuales, involucran múltiples pasillos, grúas con múltiple plataforma, estantería de múltiple profundidad, múltiples puntos de ingreso y salida de material, grúas no dedicadas, entre otras características. Sin embargo, desde los estudios propuestos por las tres perspectivas de modelado, se identifica que la mayoría de estos sistemas han sido abordados mediante modelos analíticos y de simulación; luego, resulta importante proponer nuevos modelos matemáticos para su análisis. Lo anterior da lugar a la presente investigación, afirmando la importancia teórica de proponer un modelo de optimización exacto para las operaciones de secuenciación y asignación de

- ubicaciones en un AS/RS con unidad de carga, múltiples pasillos, grúas no dedicadas, múltiples puntos de ingreso y salida de material, y doble plataforma.
- **Decisiones de control:** En este conjunto, las tareas más estudiadas abordan secuenciación, asignación de ubicaciones y políticas de almacenamiento. De esta última, resaltan los resultados de aquellas investigaciones que las involucran, definiendo a la política basada en clases como la mejor alternativa. A partir de esto, se propone plantear el modelo matemático para las operaciones de secuenciación y asignación de ubicaciones, considerando las demás decisiones de control a partir de lo encontrado en literatura. Además, al involucrar grúas no dedicadas, se propone estudiar un criterio de asignación grúa-pasillo, elemento que no ha sido abordado en investigaciones previas.
 - **Medida de desempeño:** De los estudios revisados, se encuentra que la medida de desempeño más utilizada para la evaluación de los AS/RS resulta ser el tiempo de ciclo. Sin embargo, a partir de ella, otras métricas pueden ser consideradas, estudiando por ejemplo el flujo de material o el costo total de la operación. Investigaciones más recientes involucran métricas de consumo energético y costo de inversión. De lo anterior, y a partir de las operaciones a considerar por el modelo matemático, se identifica que el sistema debe evaluarse, en primera medida, desde el tiempo de ciclo, sin resistir otras posibles métricas relacionadas.
 - **Políticas de control a evaluar:** A partir de lo encontrado en literatura, y considerando las operaciones que respalda el modelo de optimización, se propone evaluar el tamaño de las clases de almacenamiento, el factor de ocupación del sistema y diferentes niveles de secuenciación por bloques para las tareas de recuperación.

5. Formulación de un Modelo General para la Toma de Decisiones en un AS/RS

Como se mencionó en la sección 4.4, debido a las múltiples decisiones consideradas en el diseño y control de los AS/RS, el modelo matemático propuesto se plantea como una etapa de un modelo general para la toma de decisiones (ver Figura 3). A continuación, se describen los parámetros de entrada generales del modelo y las tres etapas desarrolladas, relacionadas con: el criterio de asignación ítem-pasillo (etapa 1), el criterio para la definición del número de grúas y la asignación grúa – pasillo (etapa 2), y el modelo de programación lineal entera para las operaciones de secuenciación y asignación de ubicaciones (etapa 3).

5.1. Parámetros de Entrada

A partir de lo obtenido en la revisión de literatura, a continuación, se definen los parámetros de entrada y las características particulares del AS/RS a considerar para el modelo general de toma de decisiones propuesto.

- **Diseño físico del sistema:** Se considera un sistema de almacenamiento compuesto por un conjunto de pasillos y estantes discretos; estos últimos, definidos estructuralmente por niveles, bahías, y posiciones, para las cuales, se define la capacidad en términos de unidades de carga. El número y la ubicación de los puntos de ingreso y salida de material se toma adaptando el diseño propuesto en Tone Lerher et al. (2010), definiendo entonces un punto de salida de material para cada pasillo, y un punto de ingreso de material para cada grúa (ver Figura 7).
- **Número de clases:** El sistema objeto de estudio considera 3 niveles de clase (ABC) debido a que este perfil de inventario favorece las políticas de operación en entornos automatizados (Gamberi et al., 2012).

- Tamaño de las clases: De acuerdo con Gagliardi et al. (2015), se establece un tamaño de clase para la categoría A del 20% de los SKU. El 80% restante se reparte entre las clases B y C, siendo la división de este porcentaje una de las políticas de control a evaluar a través del modelo.
- Número de referencias (SKU): Adaptando las instancias estudiadas por Gagliardi et al. (2012b), se define una proporción de ubicaciones por ítem (LTPR – locations to product ratio) igual a 4. Lo anterior, define el número total de referencias como el 25% de las ubicaciones totales del sistema.
- Factor de asimetría: Define el comportamiento de la curva de demanda acumulada del total de referencias del sistema, siguiendo la expresión $G(i) = \left(\frac{i}{n}\right)^s$, donde n representa el total de SKU, $G(i)$ la demanda acumulada de la referencia i y s el factor de asimetría, con $0 < s \leq 1$ (Hausman et al., 1976). Adicionalmente, este factor permite definir el número de ubicaciones por asignar a cada referencia en proporción a su demanda. En Gagliardi et al. (2012b) se propone la expresión $a_i = L \left[\left(\frac{i}{n}\right)^s - \left(\frac{i-1}{n}\right)^s \right]$, donde L define la capacidad total del sistema en unidades de carga y a_i las posiciones asignadas a la referencia i .
- Dimensiones del ítem: Al considerar un sistema discreto con unidad de carga, resulta importante definir las dimensiones del ítem (alto h , ancho w , largo l). Para este parámetro, se toman los valores propuestos en Tone Lerher et al. (2010).
- Dimensiones dentro del rack: Siguiendo la propuesta de diseño planteada en Tone Lerher et al. (2010) (ver Figura 8), se definen las dimensiones de las columnas (r_1),

- vigas (r_3) y soportes del rack (r_2), al igual que el espacio entre ítems (e_1) y el espacio entre niveles (e_2).
- Profundidad del rack (R_l): Se asume igual al largo l del ítem considerando que el estante es de única profundidad (ver Figura 8).
 - Ancho del rack (R_w): Se calcula a partir de la dimensión de la viga (r_3), el espacio entre ítems (e_1) y el número de bahías y posiciones del sistema. Esta dimensión determina el largo del pasillo (ver Figura 8).
 - Ancho del pasillo (A_l) y ancho del área de transferencia (CA_w): A partir del diseño propuesto en Tone Lerher et al. (2010) (ver Figura 7).
 - Cinemática de la grúa: Al evaluar el desempeño del sistema desde el tiempo de ciclo, resulta necesario detallar las características de la grúa en términos de velocidad y aceleración. Los parámetros de velocidad se definen a partir de Xu et al. (2016) debido a que los autores analizan un sistema con múltiples pasillos; mientras que, siguiendo lo planteado en Gagliardi et al. (2015), no se considera aceleración en el movimiento de la grúa.
 - Tamaño de las listas de almacenamiento y recuperación: Define la cantidad de ciclos que la grúa deberá realizar para satisfacer los ingresos y las salidas de material. Se consideran listas simétricas (de igual tamaño) siguiendo lo propuesto en Gagliardi et al. (2014b); además, se propone un tamaño de lista igual al 10% de la capacidad total del sistema.

Figura 7.
Diseño general del sistema (a)

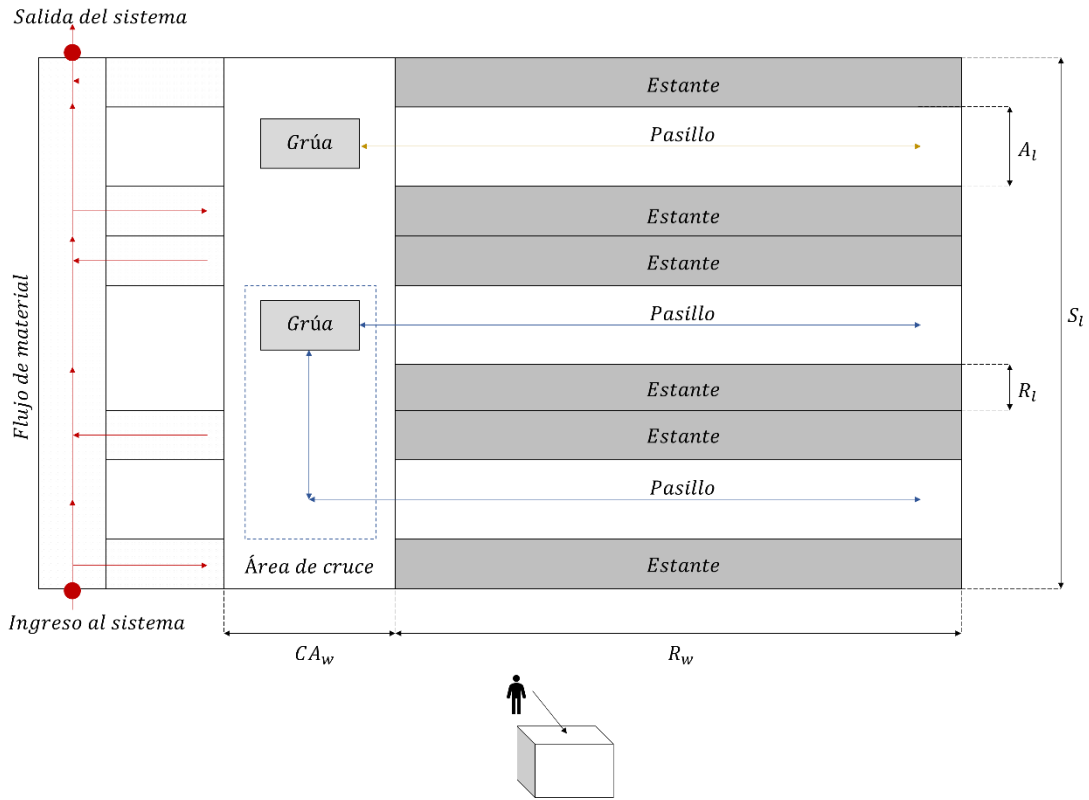
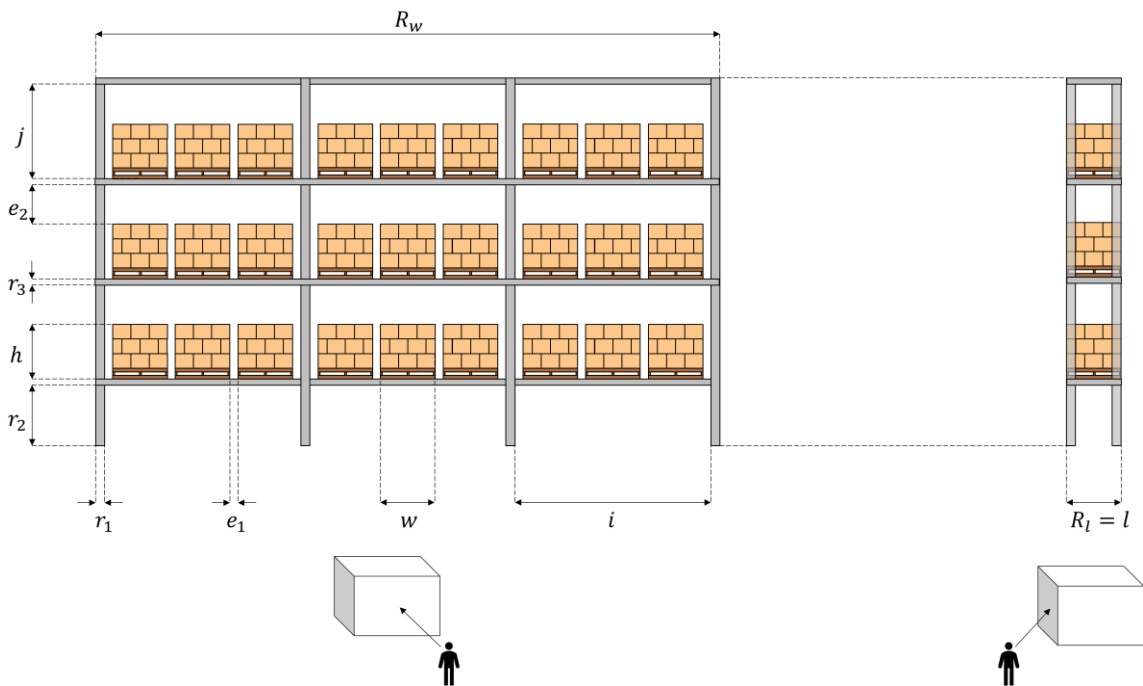


Figura 8.
Diseño general del sistema (b)



5.2. Criterio de Asignación Ítem-pasillo

La primera etapa del modelo general para la toma de decisiones involucra el desarrollo de un criterio para la asignación ítem – pasillo, el cual, favorece la decisión de cuántas y cuáles posiciones del rack deben disponerse para cada una de las clases ABC. Este criterio, permite representar el sistema en términos de los ítems que almacena o dispone cada pasillo, elemento que resulta importante para definir el número adecuado de grúas con su respectiva asignación.

De acuerdo con Gagliardi et al. (2015), los AS/RS con múltiples pasillos pueden ser gestionados a partir de dos estrategias de almacenamiento no categorizado (ver Figura 9). La primera, establece un almacenamiento por pasillos, en el que la asignación de ubicaciones se realiza a partir de una métrica de desempeño particular; como, por ejemplo, el tiempo de viaje o la distancia existente entre cada posición y el punto de ingreso y salida de material. La segunda, propone un almacenamiento transversal, en la cual, se asignan las ubicaciones buscando uniformidad de clases, es decir, se asegura que exista la misma cantidad de posiciones de cada clase en cada pasillo. De su trabajo, se concluye que un almacenamiento transversal favorece el balance de carga en las grúas del sistema; lo anterior, bajo el supuesto de que se cuenta con grúas dedicadas en cada uno de sus pasillos.

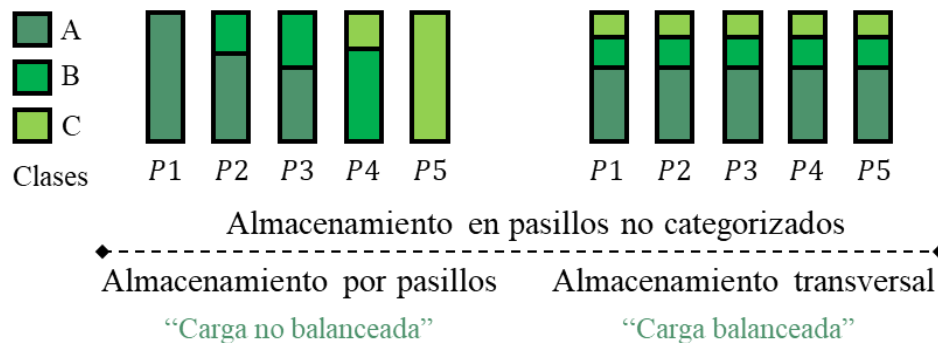
Sin embargo, cuando el AS/RS cuenta con menor cantidad de grúas que de pasillos, la estrategia de almacenamiento transversal no asegura una carga balanceada en el sistema; esto, debido a la necesidad de que una o varias de ellas atiendan los requerimientos de múltiples pasillos. Bajo este contexto, el almacenamiento por pasillos favorece el balance de las operaciones, permitiendo que la carga de las grúas se equilibre en función de los pasillos que beneficie atender.

A partir de lo anterior, y considerando que el sistema objeto de estudio involucra grúas no dedicadas a un solo pasillo, se propone plantear el criterio de asignación desde una estrategia de

almacenamiento por pasillos, generando a partir de él una representación del sistema que favorezca las decisiones de la próxima etapa del modelo.

Figura 9.

Estrategias de almacenamiento basado en clases en pasillos no categorizados



Nota. Adaptado de Gagliardi et al. (2015)

A continuación, se detalla el marco propuesto para el desarrollo del presente criterio.

- Definición de la Medida de Desempeño: Se define como métrica de asignación el tiempo de viaje necesario para ir de una posición dada al punto de salida de material del sistema.
- Definición del Número de Ubicaciones para cada Clase ABC: Siguiendo las expresiones presentadas en la sección 5.1 asociadas con la demanda acumulada de cada ítem y su respectiva asignación de ubicaciones, se establece el número total de posiciones a asignar para cada una de las clases considerando su tamaño. La suma de las locaciones de los ítems de cada clase definirá el total de ubicaciones asignadas a cada una de ellas. La Tabla 3 muestra un ejemplo para un sistema con 10 referencias, 50 posiciones, factor de asimetría de 0.4 y tamaño de clase 20-20-60 (ABC).

Tabla 3.*Número de ubicaciones para cada clase ABC. Ejemplo.*

<i>SKU</i>	<i>Clase</i>	<i>G(i)</i>	<i>a(i)</i>	<i>Ubicaciones acumuladas</i>	<i>Ubicaciones por clase</i>
1	A	0,398	19,91	19,91	26
2	A	0,525	6,36	26,27 \approx 26	
3	B	0,618	4,62	30,89	35 – 26 = 9
4	B	0,693	3,77	34,66 \approx 35	
5	C	0,758	3,24	37,9	50 – 35 = 15
6	C	0,815	2,87	40,77	
7	C	0,867	2,59	43,36	
8	C	0,915	2,38	45,74	
9	C	0,959	2,21	47,95	
10	C	1,000	2,05	50	

Nota. Las ubicaciones totales por clase se discretizan al entero más cercano priorizando el orden ABC.

- Asignación de Ubicaciones Siguiendo Estrategia de Almacenamiento por Pasillos: Una vez definidas las ubicaciones de las clases, cada una de ellas es asignada siguiendo la métrica del tiempo de viaje con respecto al punto de salida de material del sistema. Para ello, considerando las dimensiones del sistema y las velocidades de la grúa, se ordenan las locaciones de menor a mayor en función de esta métrica, y se asignan en orden priorizando la clase, es decir, primero se asignan las ubicaciones de la clase A, luego las de la clase B y finalmente, las de la clase C. Esta asignación, permite definir cuantas y cuales posiciones del sistema están dispuestas para cada clase en cada pasillo.

5.2.1. Representación del Sistema a través de un Vector de Priorización.

Establecida la asignación de ubicaciones, se propone representar el sistema mediante un vector de priorización que considere los elementos que almacena cada pasillo, permitiendo identificar la necesidad de atención de cada uno de ellos y, posteriormente, favorecer la decisión del número de grúas del sistema y su asignación. A continuación, se detalla el procedimiento propuesto para la obtención de este vector.

5.2.1.1. Parámetros de Entrada. Buscando diferenciar la carga operativa requerida por los ítems de cada clase, resulta necesario definir los siguientes parámetros adicionales:

- Peso relativo de un ítem de clase A sobre un ítem de clase B (AB): Definido a partir de la relación entre la demanda de la clase A sobre la clase B.
- Peso relativo de un ítem de clase B sobre un ítem de clase C (BC): Definido a partir de la relación entre la demanda de la clase B sobre la clase C.

5.2.1.2. Definición de los Pesos de los Ítems de cada Clase. Se parte de un sistema no priorizado, es decir, un sistema con almacenamiento transversal y carga balanceada. Bajo este supuesto, y considerando que se conoce la cantidad de ítems de cada clase en el sistema, se propone el siguiente sistema de ecuaciones.

$$P_p' = W_A * A' + W_B * B' + W_C * C' \quad (1)$$

$$W_A = AB * W_B \quad (2)$$

$$W_B = BC * W_C \quad (3)$$

Donde, P_p' representa la priorización del pasillo p en un sistema balanceado; W_A , W_B y W_C denotan los pesos de los ítems de cada clase, mientras que A' , B' y C' , indican la cantidad de ítems de cada clase en el pasillo considerando almacenamiento transversal.

Del sistema de ecuaciones propuesto, además de los pesos relativos entre clases AB y BC , los valores conocidos resultan ser P_p', A', B', C' ; partiendo de un sistema balanceado (misma cantidad de ítems de cada clase en cada pasillo) y considerando que la suma de la priorización de los pasillos del sistema es igual a uno. La Tabla 4 ejemplifica el cálculo de estos elementos considerando las ubicaciones definidas en el ejemplo de la Tabla 3.

Tabla 4.

Priorización y ubicaciones en un sistema balanceado. Ejemplo.

	<i>Total</i>	<i>Pasillo 1</i>	<i>Pasillo 2</i>	<i>Pasillo 3</i>	<i>Pasillo 4</i>
<i>Priorización</i>	1	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>Clase A</i>	26	6,5	6,5	6,5	6,5
<i>Clase B</i>	9	2,25	2,25	2,25	2,25
<i>Clase C</i>	15	3,75	3,75	3,75	3,75

Nota. Los valores de priorización y de ítems por clase para cada pasillo son iguales, luego $P'_p = 0.25$, $A' = 6.5$, $B' = 2.25$, $C' = 3.75$. El ejemplo considera un sistema con 4 pasillos.

Definidos los insumos para el sistema de ecuaciones, este se resuelve y se obtienen los pesos de los ítems de cada clase W_A , W_B y W_C .

5.2.1.3. Cálculo de la Priorización de cada Pasillo. Encontrados los pesos de cada clase, y a partir de la asignación realizada en el sistema objeto de estudio mediante almacenamiento por pasillos (ver sección 5.2), se calcula la priorización de cada pasillo siguiendo la Ecuación (4).

$$P_p = W_A * A + W_B * B + W_C * C \quad (4)$$

Donde, P_p representa la priorización del pasillo; mientras que A , B y C , indican la cantidad de ítems de cada clase en el pasillo del sistema objeto de estudio. Hallada la priorización del sistema, esta se relativiza buscando que la suma del vector de priorización $\sum_p P_p$ sea igual a uno. En la sección 6.1 se presenta un análisis de sensibilidad del vector de priorización propuesto.

5.3. Criterio para la Definición del Número de Grúas y la Asignación Grúa – pasillo

La segunda etapa del modelo general involucra un criterio para la definición del número de grúas del sistema y su respectiva asignación. Tomando como insumo el vector de priorización obtenido en la primera etapa, se propone un método heurístico en el que, desde la perspectiva del costo de operación, se defina adecuadamente esta decisión de diseño.

En los AS/RS, existen dos escenarios relacionados con la cantidad de grúas disponibles en el sistema. El primero de ellos, involucra sistemas con menor número de grúas que de pasillos, en

donde la decisión de qué grúa atiende a cada pasillo es tomada bajo algún criterio particular. En caso de que el sistema cuente con una única grúa, el criterio de atención resulta innecesario. El segundo escenario, propone sistemas con una grúa por pasillo, o sistemas con grúas dedicadas, en donde el análisis general se reduce a la unión de múltiples subsistemas, uno por cada grúa o pasillo existente. De lo anterior, y a partir de lo discutido en la revisión de literatura (ver sección 4.4), resulta interesante el análisis de los AS/RS no tradicionales que involucren grúas no dedicadas a un solo pasillo. Si bien, existen estudios en donde se involucra el número de grúas como variable de diseño (Alnahhal et al., 2022), existe un déficit relacionado con la decisión de asignación grúa – pasillo en este tipo de sistemas. El desarrollo de este criterio permite gestionar la operación de las grúas a partir de los requerimientos de los pasillos del sistema, evitando con esto posibles bloqueos o colisiones que afecten su dinámica.

A continuación, se define el procedimiento del método heurístico propuesto.

5.3.1. Supuestos del Método.

A partir del sistema objeto de estudio y de las salidas obtenidas del primer criterio, el método propuesto se soporta en los siguientes supuestos.

- **S1.** Los pasillos están priorizados bajo una escala relativa, es decir, la suma de las priorizaciones de cada pasillo debe ser igual a 1 (Salida de la primera etapa del modelo general para la toma de decisiones).
- **S2.** A partir de lo descrito en Gagliardi et al. (2015), se considera que el mejor sistema desde la perspectiva de la atención de requerimientos (almacenamientos y recuperaciones de material) involucra grúas dedicadas a un solo pasillo.
- **S3.** Los pasillos asignados a cada una de las grúas deben ser adyacentes entre sí. Lo anterior, evitando posibles bloqueos o colisiones en el sistema.

- **S4.** Los costos de operación del sistema son conocidos y se representan en dos. CA representa el costo operativo de tener una grúa adicional, mientras que CS define el costo operativo (de oportunidad) de no tener una grúa adicional.

5.3.2. Definición de las Alternativas de Asignación Considerando el Número de Pasillos del Sistema.

A partir de lo descrito en la sección 5.3.1, el tercer supuesto del método exige que los pasillos asignados a cada grúa sean adyacentes entre sí. Lo anterior, define el número de alternativas factibles a partir del número de pasillos del sistema, siguiendo la expresión descrita en la Ecuación (5). La Tabla 5 ejemplifica las alternativas factibles para un sistema con 5 pasillos.

$$AT = 2^{P-1} \quad (5)$$

En donde AT representa el total de alternativas de asignación y P los pasillos del sistema.

Tabla 5.

Alternativas de asignación en un sistema con cinco pasillos. Ejemplo.

#	<i>Alternativa de asignación</i>					<i>Grúas requeridas</i>
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	
4	1	1	1	2	2	
5	1	1	1	1	2	
6	1	2	3	3	3	
7	1	2	2	3	3	
8	1	1	2	3	3	
9	1	2	2	2	3	
10	1	1	2	2	3	
11	1	1	1	2	3	
12	1	2	3	4	4	4
13	1	2	3	3	4	
14	1	2	2	3	4	
15	1	1	2	3	4	
16	1	2	3	4	5	

5.3.3. Prorrateo de las Grúas del Sistema Siguiendo la Alternativa de Asignación y las Priorizaciones de cada Pasillo.

En esta etapa, se prorratean las grúas disponibles en cada alternativa a partir de su asignación y la priorización de los pasillos que cada una de ellas atiende. La Figura 10 muestra un ejemplo de esta etapa del procedimiento.

5.3.4. Cálculo del Índice de Ponderación.

Se propone el cálculo de este índice con el objetivo de ponderar el costo total de la alternativa, de forma que este involucre las grúas existentes en el sistema y penalice la asignación definida.

Las Ecuación (6) define el cálculo del índice de ponderación IP , en donde G representa las grúas del sistema y GP las grúas ponderadas del sistema (ver Ecuación (7)).

$$IP = \frac{G}{GP} \quad (6)$$

$$GP = \text{Max}[\#gruas permitidas en el sistema] * \sum_p R_p * P_p \quad (7)$$

Donde P_p y R_p definen la priorización y el prorrateo del pasillo p , respectivamente. La Tabla 6 define el cálculo del índice de ponderación para las 16 alternativas mostradas en el ejemplo de la Tabla 5.

Figura 10.

Prorrateo de las grúas del sistema. Ejemplo.

Subsistema	1	2		3	
Pasillo	1	2	3	4	5
Priorización	0,4	0,3	0,2	0,05	0,05
Alternativa	1	2	2	3	3

	0,4/0,4	0,3/0,5	0,2/0,5	0,05/0,1	0,05/0,1
	↓	↓	↓	↓	↓
Prorrateo	1	0,6	0,4	0,5	0,5

El prorrateo se realiza relativizando la priorización de cada subsistema

Tabla 6.
Índice de ponderación. Ejemplo

#	Alternativa de asignación					Prorrateo R_p					$\sum_p R_p * P_p$	GP	IP
1	1	1	1	1	1	0,40	0,30	0,20	0,05	0,05	0,30	1,48	0,68
2	1	2	2	2	2	1	0,50	0,33	0,08	0,08	0,63	3,13	0,64
3	1	1	2	2	2	0,57	0,43	0,67	0,17	0,17	0,51	2,54	0,79
4	1	1	1	2	2	0,44	0,33	0,22	0,50	0,50	0,37	1,86	1,07
5	1	1	1	1	2	0,42	0,32	0,21	0,05	1	0,36	1,79	1,12
6	1	2	3	3	3	1	1	0,67	0,17	0,17	0,85	4,25	0,71
7	1	2	2	3	3	1	0,60	0,40	0,50	0,50	0,71	3,55	0,85
8	1	1	2	3	3	0,57	0,43	1	0,50	0,50	0,61	3,04	0,99
9	1	2	2	2	3	1,00	0,55	0,36	0,09	1	0,69	3,45	0,87
10	1	1	2	2	3	0,57	0,43	0,80	0,20	1	0,58	2,89	1,04
11	1	1	1	2	3	0,44	0,33	0,22	1	1	0,42	2,11	1,42
12	1	2	3	4	4	1	1	1	0,50	0,50	0,95	4,75	0,84
13	1	2	3	3	4	1	1	0,80	0,20	1	0,92	4,60	0,87
14	1	2	2	3	4	1	0,60	0,40	1	1	0,76	3,80	1,05
15	1	1	2	3	4	0,57	0,43	1	1	1	0,66	3,29	1,22
16	1	2	3	4	5	1	1	1	1	1	1	5,00	1,00

Nota. Se toma como vector de ponderación el presentado en la Figura 10.

5.3.5. Construcción de la Función de Costo.

A partir del segundo y cuarto supuesto presentado en la sección 5.3.1, a continuación, se define la función de costo a minimizar por el método heurístico planteado (ver Ecuaciones (8), (9) y (10)).

$$\text{Costo total} = CT = CT_{\text{operación}} + CT_{\text{oportunidad}} \quad (8)$$

Donde,

$$CT_{\text{operación}} = CA * G \quad (9)$$

$$CT_{\text{oportunidad}} = CS * (\text{Max}[\#gruas permitidas en el sistema] - G) \quad (10)$$

Para cada alternativa, se calcula el costo total siguiendo la Ecuación (8).

5.3.6. Ajuste de la Función de Costo.

En esta etapa del procedimiento, se pondera el costo total calculado buscando que, además de considerar las grúas existentes en el sistema, represente la asignación definida en cada alternativa. El ajuste de la función de costo se da multiplicando el costo de la alternativa por su respectivo índice de ponderación. La Ecuación (11) define el cálculo del costo ajustado.

$$\text{Costo Total Ajustado} = CTA = CT * IP \quad (11)$$

5.3.7. Elección de la Mejor Alternativa.

El método propone que la mejor alternativa sea aquella cuyo costo total ajustado sea menor. LA Tabla 7 muestra el costo total ajustado y la elección de la mejor alternativa del ejemplo mostrado en la Tabla 6.

Tabla 7.

Costo total ajustado de las alternativas de asignación. Ejemplo.

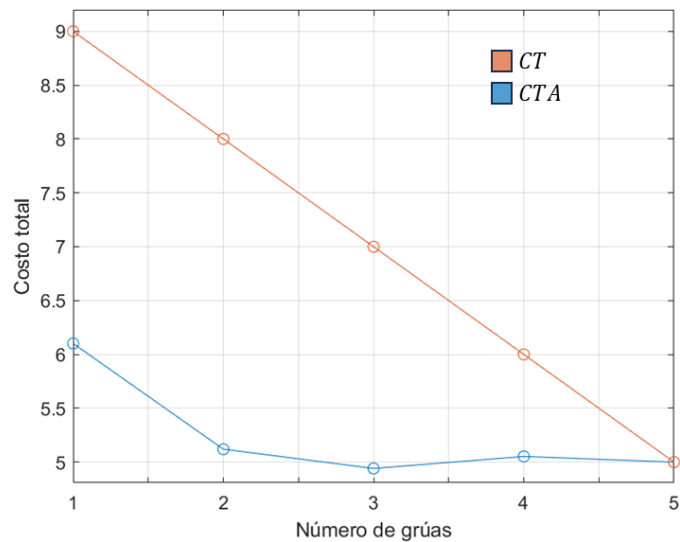
#	Alternativa de asignación						IP	CT	CTA
1	1	1	1	1	1	1	0,68	9	*6,102
2	1	2	2	2	2	2	0,64	8	*5,12
3	1	1	2	2	2	2	0,79	8	6,31
4	1	1	1	2	2	2	1,07	8	8,597
5	1	1	1	1	2	2	1,12	8	8,941
6	1	2	3	3	3	3	0,71	7	*4,941
7	1	2	2	3	3	3	0,85	7	5,915
8	1	1	2	3	3	3	0,99	7	6,918
9	1	2	2	2	3	3	0,87	7	6,079
10	1	1	2	2	3	3	1,04	7	7,277
11	1	1	1	2	3	3	1,42	7	9,947
12	1	2	3	4	4	4	0,84	6	*5,053
13	1	2	3	3	4	4	0,87	6	5,217
14	1	2	2	3	4	4	1,05	6	6,316
15	1	1	2	3	4	4	1,22	6	7,304
16	1	2	3	4	5	5	1,00	5	*5

Nota. Para el cálculo del costo total, se consideró $CA = 1$ y $CS = 2$. Los costos marcados con * representan la mejor asignación en cada subconjunto de alternativas.

La Figura 11 muestra el impacto del índice de ponderación en la función de costo total. Los datos presentados definen la mejor alternativa de asignación para cada nivel de la variable número de grúas. En la sección 6.2 se presenta un análisis de sensibilidad de la heurística con respecto a los costos CA y CS .

Figura 11.

Impacto del índice de ponderación en el costo total [unidades de costo]. Ejemplo.



5.4. Modelo de Programación Lineal Entera para las Operaciones de Secuenciación y Asignación de Ubicaciones

La tercera y última etapa del modelo general para la toma de decisiones define un modelo de optimización para las operaciones de secuenciación y asignación de ubicaciones. Diferentes autores proponen modelos matemáticos para abordar estas operaciones, definiendo sistemas estáticos dada la complejidad asociada al dinamismo del flujo de material (Gagliardi et al., 2014b; Tanaka & Araki, 2009; Yang et al., 2015).

En un sistema estático, las posiciones factibles de almacenamiento son aquellas que se presentan vacías en el estado inicial de ocupación; mientras que las recuperaciones, están definidas únicamente por los ítems almacenados en el estado inicial. Esto quiere decir que, en un sistema

estático, un elemento que sea almacenado en cualquier instante de tiempo no puede ser recuperado por la grúa en otro momento. Esta perspectiva del sistema permite definir todas las operaciones de secuenciación y asignación en una única corrida del modelo matemático.

Ahora bien, en la práctica, el dinamismo de los estados del sistema es uno de los elementos fundamentales de los AS/RS; luego, acorde con esta característica, el modelo de optimización planteado en esta investigación se propone desde una perspectiva dinámica. El enfoque dinámico del sistema obliga a una constante actualización de los estados de los racks en la medida en que se ejecutan las operaciones de secuenciación, por ende, el modelo de optimización propuesto responde únicamente a la operación de cada ciclo, ejecutándose las veces que sea necesario hasta que satisfaga el total de ingresos y salidas de material. A continuación, en las siguientes secciones, se detalla el modelo matemático planteado y su funcionamiento acorde a lo descrito previamente.

5.4.1. Parámetros de Entrada.

El modelo de optimización toma cómo entradas los parámetros generales definidos y las salidas de las dos primeras etapas. Adicionalmente, involucra los siguientes inputs adicionales.

- Factor de ocupación: Describe el grado de ocupación del sistema. Este parámetro es adaptado a partir de los valores estudiados en Xu et al. (2016).
- Tipo y tamaño del bloque de secuenciación: Define el número de recuperaciones a considerar al momento de realizar la secuenciación. Acorde a las políticas definidas en Roodbergen & Vis (2009), se considera secuenciación con bloques fijos evitando preferencias de clases en las rutas.

5.4.2. Supuestos del Modelo.

El modelo matemático planteado se soporta en los siguientes supuestos.

- **S1.** Las listas de ingreso y salida de material son simétricas en tamaño.

- **S2.** Las grúas deben respetar la asignación de pasillos definida en el segundo criterio del modelo general.
- **S3.** Las grúas pueden responder a ciclos dobles o cuádruples de secuenciación. Un ciclo doble involucra un almacenamiento y una recuperación; mientras que, un ciclo cuádruple, representa la operación de dos ingresos y dos salidas de material.
- **S4.** Las listas de almacenamiento se conocen de antemano. Se consideran únicamente listas factibles, es decir, en el instante cero existen ubicaciones disponibles para el total de elementos por almacenar.
- **S5.** Las listas de recuperación se generan una vez se satisfacen las salidas del bloque. La orden de recuperación debe estar ligada a un único ítem almacenado en el sistema.
- **S6.** Los almacenamientos deben ejecutarse en el estricto orden en el que lo establece la lista. Las recuperaciones serán abordadas buscando la mejor combinación posible dadas las alternativas del bloque. Ambas listas, son generadas mediante una distribución discreta proveniente de la función de demanda $G(i) = \left(\frac{i}{n}\right)^S$ propuesta por Hausman et al. (1976).
- **S7.** Existen listas de almacenamiento para cada subsistema definidas a partir de los pasillos que cada uno de estos involucra. La decisión de en qué subsistema se almacena cada ítem se toma a partir de la distribución ítem-pasillo realizada en el primer criterio.
- **S8.** La matriz de tiempos de viaje entre nodos se actualiza cada vez que la grúa ejecuta un ciclo (almacena y recupera).

5.4.3. Descripción del Modelo Matemático.

El objetivo del modelo planteado es minimizar el tiempo de viaje de la grúa en cada uno de los ciclos de secuenciación.

5.4.3.1. Parámetros del Modelo.

- $C1$: Define el número de ubicaciones disponibles para almacenar el ítem tipo 1.
- $C2$: Define el número de ubicaciones disponibles para almacenar el ítem tipo 2.
- B : Define el número de recuperaciones disponibles. Representa el tamaño del bloque.
- S : Define el número de puntos de salida de material disponibles.
- $A1$: Define la cantidad de ítems tipo 1 por almacenar.
- $A2$: Define la cantidad de ítems tipo 2 por almacenar.
- R : Define la cantidad de ítems por recuperar.
- t : Tiempo de viaje entre dos ubicaciones.

5.4.3.2. Conjuntos.

- $o \in \{0\}$. Representa el punto de ingreso del material.
- $h \in [1, C1] \rightarrow h \in \mathbb{Z}$. Representa las ubicaciones disponibles para almacenar el ítem tipo 1.
- $k \in [1 + C1, C1 + C2] \rightarrow k \in \mathbb{Z}$. Representa las ubicaciones disponibles para almacenar el ítem tipo 2.
- $b \in [1 + C1 + C2, C1 + C2 + B] \rightarrow b \in \mathbb{Z}$. Representa las recuperaciones disponibles.
- $f \in [1 + C1 + C2 + B, C1 + C2 + B + S] \rightarrow f \in \mathbb{Z}$. Representa las salidas disponibles de material.
- $i, j \in [0, C1 + C2 + B + S] \rightarrow i, j \in \mathbb{Z}$. Representa las ubicaciones /nodos disponibles del sistema.

5.4.3.3. Variables Binarias.

- $X_{i,j} = 1$ si la grúa visita la ubicación j inmediatamente después de la ubicación i , 0 en otro caso.
- $Y_i = 1$ si se visita la ubicación i durante el ciclo, 0 en otro caso.

5.4.3.4. Función Objetivo. Minimiza el tiempo de ciclo de secuenciación.

$$\min z = \sum_i \sum_j t_{i,j} * X_{i,j} \quad (12)$$

5.4.3.5. Restricciones del Modelo.

$$R1 \dots \sum_h Y_h = A1 \quad (13)$$

$$R2 \dots \sum_k Y_k = A2 \quad (14)$$

$$R3 \dots \sum_b Y_b = R \quad (15)$$

$$R4 \dots \sum_f Y_f = 1 \quad (16)$$

$$R5 \dots \sum_j X_{i,j} + \sum_j X_{j,i} = 2Y_i \quad \forall i \rightarrow i \neq j \quad (17)$$

$$R6 \dots \sum_j X_{i,j} - \sum_j X_{j,i} = 0 \quad \forall i \rightarrow i \neq j \quad (18)$$

$$R7 \dots X_{i,j} + X_{j,i} \leq 1 \quad \forall i, j \rightarrow i < j \quad (19)$$

$$R8 \dots \sum_h X_{o,h} + \sum_k X_{o,k} = 1 \quad (20)$$

$$R9 \dots \sum_b \sum_f X_{b,f} = 1 \quad (21)$$

$$R10 \dots \sum_f X_{f,o} = 1 \quad (22)$$

$$R11 \dots Y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \quad (23)$$

$$R12 \dots X_{i,j} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (24)$$

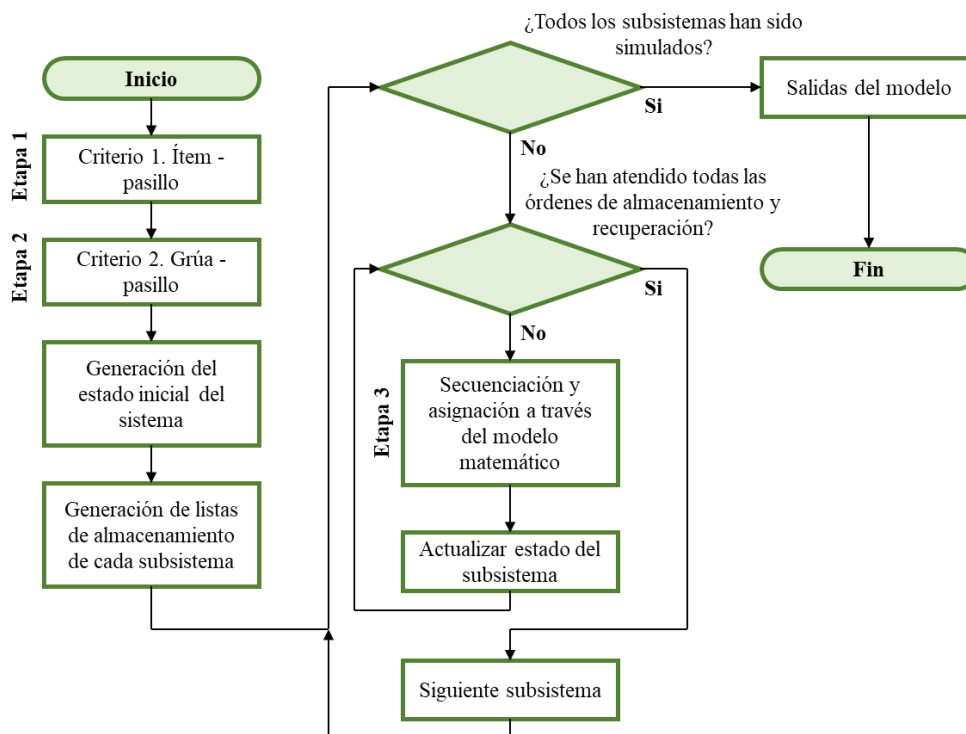
Las restricciones $R1$ y $R2$ aseguran que se almacenen los ítems de cada tipo en ubicaciones factibles. $R3$ permite las recuperaciones por ciclo, mientras que $R4$ obliga a que se visite una ubicación de salida de material durante la ruta. Las restricciones $R5$ y $R6$ construyen la ruta de la grúa y la restricción $R7$ evita que se creen subtours. Debido a la capacidad de la grúa y a las características del ciclo de secuenciación, únicamente deben evitarse los subtours que involucren

dos ubicaciones. $R8$, $R9$ y $R10$ aseguran la factibilidad del recorrido, es decir, que la primera operación de la secuencia sea de almacenamiento, la última sea de recuperación, y que la grúa finalice el recorrido en el punto de ingreso de material. Finalmente, $R11$ y $R12$ definen las variables del modelo.

Como se mencionó anteriormente, el modelo matemático responde a la secuencia óptima de cada ciclo; por lo anterior, resulta necesario anidarlos a un algoritmo cíclico que permita su ejecución y las actualizaciones necesarias de los estados del sistema. Gracias a la asignación grúa-pasillo determinada en el segundo criterio, el sistema de almacenamiento general puede desagregarse en varios subsistemas independientes, uno para cada grúa. Lo anterior, permite simular las operaciones de cada subsistema secuencialmente, es decir, un subsistema a la vez. La Figura 12 muestra la integración del modelo matemático dentro de la estructura del modelo general desarrollado.

Figura 12.

Diagrama de flujo del modelo general para la toma de decisiones.



6. Obtención de Soluciones a partir del Modelo

Definido el modelo general, la siguiente etapa metodológica establece su codificación para la obtención de soluciones. Haciendo uso de la licencia *Campus Agreement* con la que cuenta la Universidad Industrial de Santander, se selecciona el software Matlab² como entorno de solución. A continuación, se especifica la versión utilizada y las características técnicas del equipo de cómputo en el que se ejecutó el algoritmo (ver Tabla 8).

Tabla 8.

Versión del software y características del equipo de cómputo

Versión	MATLAB R2021a
	8 GB memoria RAM
Características del equipo	Procesador Intel(R) Core (TM) i5-1035G1 CPU @ 1.00GHz 1.20 GHz
	Sistema operativo de 64 bits

Debido a que el modelo propuesto se compone de tres etapas secuenciales, resulta necesario analizar el comportamiento de los dos primeros criterios previo a la verificación general a través de instancias. Las siguientes secciones, describen un análisis de sensibilidad de los criterios desarrollados, al igual que las instancias definidas para la verificación del modelo.

6.1. Análisis de Sensibilidad del Criterio de Asignación Ítem – pasillo

A partir de los inputs necesarios para el desarrollo de este criterio se detalla un análisis de sensibilidad del vector de priorización en función del factor de asimetría, el tamaño de las clases y el número de pasillos del sistema (Ver Tabla 9). La Figura 13 muestra los resultados del análisis realizado.

² Software matemático comercial que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Desarrollado por Mathworks y Cleve Moler. Última versión disponible: R2023a.

Figura 13.
Análisis de sensibilidad criterio ítem - pasillo

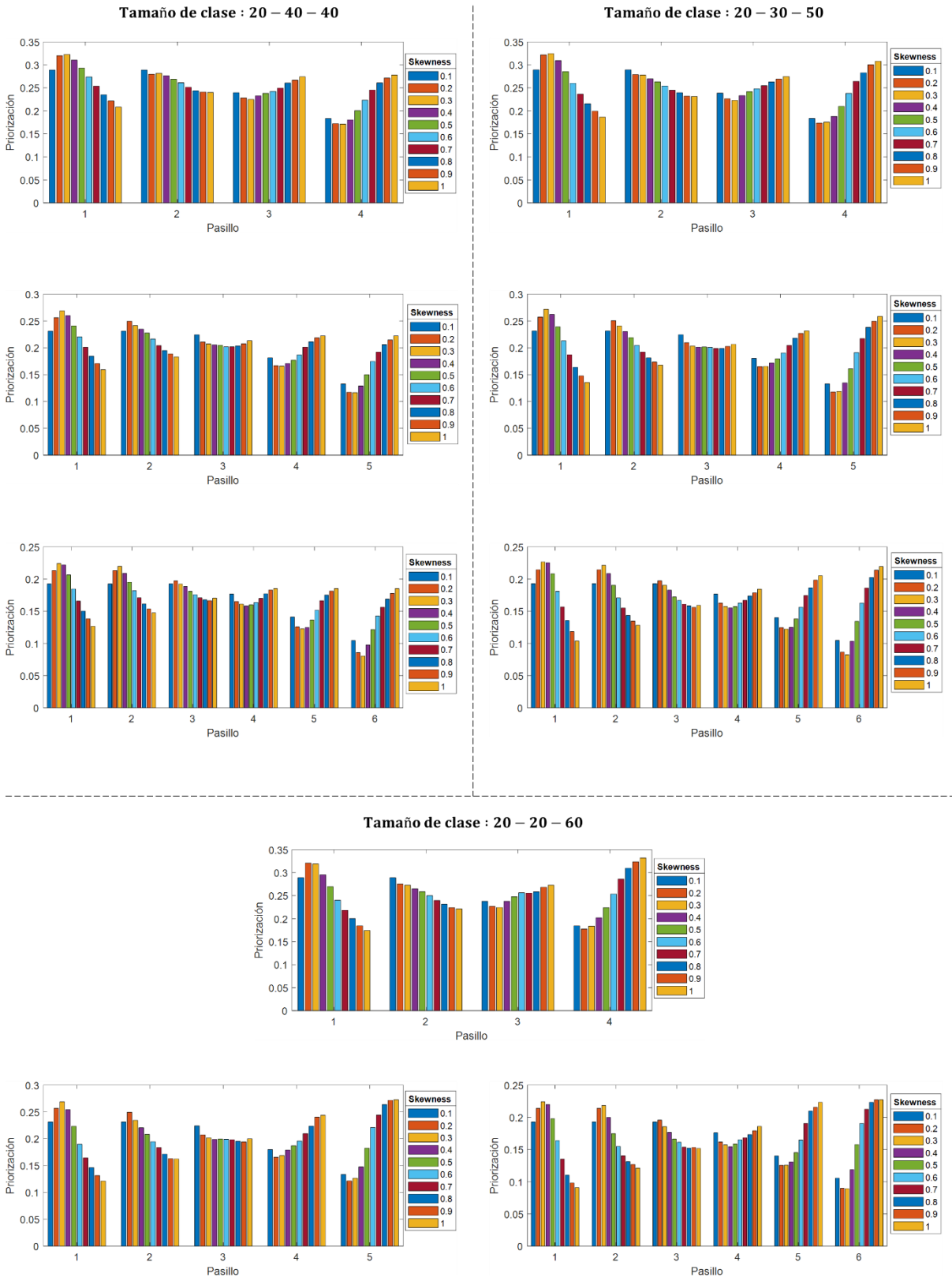


Tabla 9.

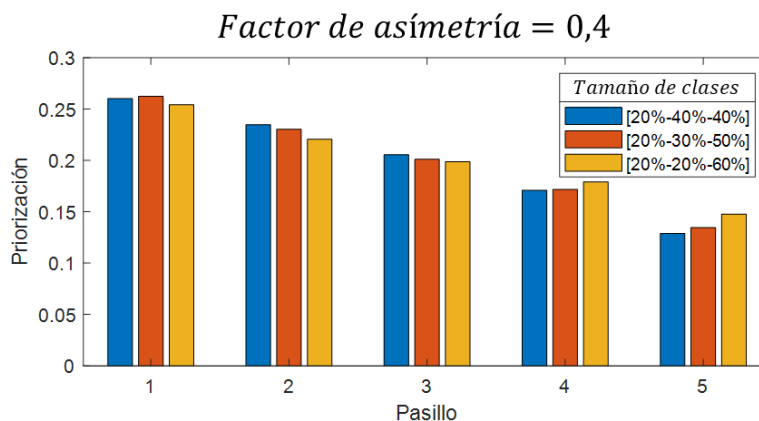
Niveles de los factores para el análisis de sensibilidad del vector de priorización

<i>Factor</i>	<i>Nivel</i>	<i>Referencia</i>
Factor de asimetría	{0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1}	Considerando que $0 < s \leq 1$ Hausman et al. (1976)
Tamaño de clases	{[20-40-40]; [20-30-50]; [20-20-60]}	Propuesto a partir de lo expuesto en Gagliardi et al. (2015)
Número de pasillos	{4;5;6}	Propuesto a partir de lo expuesto en Tone Lerher et al. (2010)

Los resultados expuestos en la Figura 13 muestran una tendencia definida con respecto al comportamiento del vector de priorización en función del factor de asimetría (s). Se concluye que existe mayor diferenciación en la priorización de los pasillos en los valores extremos de s . Estos resultados, indican que, en la medida en que el factor de asimetría se acerca a su límite superior, los ítems de la clase C toman mayor importancia en el sistema; mientras que, valores bajos de s , definen mayor importancia a los elementos de la clase A. Finalmente, se evidencia que el tamaño de las clases y el número de pasillos del sistema no afectan el comportamiento del vector (Ver Figura 14).

Figura 14.

Sensibilidad del vector de priorización en función del tamaño de las clases



6.2. Análisis de Sensibilidad del Criterio para la Definición del Número de Grúas y la Asignación Grúa-pasillo.

El análisis de sensibilidad para el criterio de la segunda etapa se realiza en función de los mismos factores definidos en la Tabla 9. Adicionalmente, este criterio involucra los parámetros de costo mencionados en el cuarto supuesto de la heurística (ver sección 5.3.1), por ende, resulta importante el análisis conjunto de estos elementos.

De lo encontrado en literatura, existe carencia de información para la definición de los costos planteados en la heurística. En la práctica, estos parámetros pueden calcularse a partir de la operación del sistema, involucrando datos históricos de tiempos de ciclo, consumo de recursos, entre otros elementos a considerar. Debido a esto, se propone el estudio de los costos planteados desde una perspectiva relativa, de forma que el análisis se realice en función de su relación y no a partir de su valor real el cual se desconoce.

A partir de lo anterior, el costo de no tener una grúa CS se relativiza con respecto al costo de tenerla CA , permitiendo entonces con el análisis de sensibilidad definir para qué valores de CS resulta factible la heurística, en qué ventanas de costo la decisión converge a sistemas de grúas dedicadas y cómo se comporta la variable número de grúas en su relación con los demás factores a estudiar, es decir, el factor de asimetría, el número de pasillos y el tamaño de clase. La Figura 15 muestra los resultados del análisis de sensibilidad realizado. Los valores resaltados definen el rango de divergencia de la variable número de grúas en función del costo CS para cada uno de los niveles de los factores estudiados.

De lo encontrado en el análisis, se observa que existe mayor divergencia en la variable número de grúas en los valores extremos del factor de asimetría. Enlazando estos resultados con lo obtenido en la primera etapa, se establece que la divergencia de esta variable se relaciona de forma directa con la diferenciación del vector de priorización. Adicionalmente, el análisis permite concluir que, a mayor número de pasillos y a mayor tamaño de la clase C, mayor es el rango de divergencia de la variable en cuestión. Los rangos de divergencia establecen los valores de costo CS para los cuales la heurística favorece la decisión de cuántas grúas resultan ideales en el sistema.

6.3. Definición de las Instancias Propuestas

A partir de los resultados del análisis de sensibilidad de los criterios y considerando los parámetros definidos en la sección 5.1, se presenta en la Tabla 10 y la Tabla 11 la definición de los valores de los parámetros de entrada y las instancias propuestas para la verificación del modelo.

Tabla 10.
Parámetros e instancias (a)

<i>Parámetros de entrada</i>		
Factor de asimetría	0,4	Gagliardi et al. (2012b)
Clases	3	Considerando clasificación ABC
Número de referencias	25% del total de ubicaciones del sistema	Gagliardi et al. (2012b)
Ancho del ítem	0,8 (m)	
Alto del ítem	0,8 (m)	
Largo del ítem	1,2 (m)	
Ancho de la columna	0,12 (m)	
Altura del primer nivel	0,3 (m)	
Ancho de la viga	0,162 (m)	Tone Lerher et al. (2010)
Espacio entre ítems	0,1 (m)	
Espacio entre niveles	0,2 (m)	
Ancho del pasillo	1,5 (m)	
Ancho del área de cruce	3 (m)	
Velocidad en x	1,5 (m/s)	
Velocidad en y	1 (m/s)	Xu et al. (2016)
Velocidad área de cruce	1 (m/s)	
Tamaño de la lista	10% del total de ubicaciones del sistema	Propuesto

Tabla 11.
Parámetros e instancias (b)

<i>Parámetros de entrada</i>		
Peso relativo de un ítem de clase A sobre un ítem de clase B (<i>AB</i>)	$AB = \frac{\%Demanda\ clase\ A}{\%Demanda\ clase\ B}$	Ver sección 5.2.1.1
Peso relativo de un ítem de clase B sobre un ítem de clase C (<i>BC</i>)	$BC = \frac{\%Demanda\ clase\ B}{\%Demanda\ clase\ C}$	
Costo de tener una grúa adicional CA	1	De lo definido en la sección 6.2, buscando un sistema con menos grúas que pasillos
Costo de no tener una grúa adicional CS	1,15	
Tamaño de clase	[20-40-40]	Propuesto a partir de lo expuesto en Gagliardi et al. (2015)
Factor de ocupación	0,55	Xu et al. (2016)
Tamaño del bloque de secuenciación	2	Propuesto a partir de la capacidad de la grúa
<i>Instancias (Tone Lerher et al., 2010)</i>		
<i>Instancia 1</i>	<i>Instancia 2</i>	<i>Instancia 3</i>
Pasillos = 5	Pasillos = 5	Pasillos = 5
Niveles = 5	Niveles = 11	Niveles = 17
Bahías = 10	Bahías = 20	Bahías = 27
Posiciones = 3	Posiciones = 3	Posiciones = 3

6.4. Verificación Mediante las Instancias Propuestas

Debido a la limitación del recurso computacional en el que se ejecutó el algoritmo que representa el modelo general de decisión, únicamente la instancia 1 pudo ser utilizada para la etapa de verificación (ver Tabla 11). Las demás instancias no pudieron ser evaluadas debido a que se superaba la capacidad de memoria del equipo de cómputo. La instancia corrida describe un sistema con 1500 posiciones, considerando 2 racks por pasillo. El modelo es verificado mediante pruebas de escritorio, en donde se corrobora la dinámica del sistema (actualización de estados) a partir de las salidas del modelo de optimización; las cuales, se obtienen a través de métodos exactos en cada una de las iteraciones del algoritmo.

7. Experimentación a través del Modelo

Una vez el modelo propuesto es verificado, la siguiente fase metodológica establece utilizarlo como herramienta de experimentación para la evaluación de algunas políticas de almacenamiento y secuenciación. Las siguientes secciones, detallan las políticas de control evaluadas al igual que los resultados obtenidos.

7.1. Políticas de Secuenciación y Almacenamiento

De lo encontrado en literatura, a continuación, se definen las políticas de control a evaluar a través del modelo (ver Tabla 12). El sistema en estudio es evaluado bajo tres factores de ocupación diferentes {0.55, 0.7, 0.85} tomando los propuestos en Xu et al. (2016).

Tabla 12.
Niveles de las políticas de control a evaluar

<i>Política de control</i>	<i>Nivel</i>	<i>Referencia</i>
Tamaño de clase (almacenamiento)	{[20-40-40], [20-30-50], [20-20-60]}	Propuesto a partir de lo expuesto en Gagliardi et al. (2015)
Tamaño del bloque de secuenciación (secuenciación)	{2,4,8}	Propuesto a partir de la capacidad de la grúa

7.2. Escenarios y Réplicas

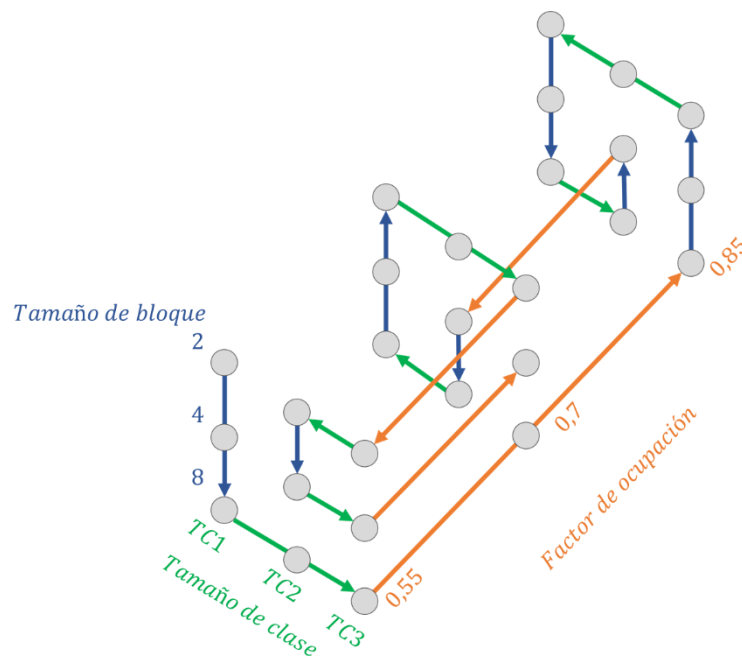
A partir de las políticas descritas y de los niveles del factor de ocupación del sistema, se propone una evaluación exhaustiva de los 27 posibles escenarios. Cada uno de estos, es replicado 3 veces considerando el elemento de aleatoriedad relacionado con la generación de las listas de ingreso y salida de material, y el estado inicial del sistema. La siguiente sección, describe los resultados encontrados en esta etapa.

7.3. Descripción del Experimento y Resultados

A continuación, se describen los resultados obtenidos en las 3 réplicas de los 27 escenarios planteados. La Figura 16 describe el orden en el que se realizaron las corridas, el cual, se propone con el fin de analizar el impacto de la variación de las políticas de control y del factor de ocupación desde diferentes direcciones.

Figura 16.

Orden de corridas



Nota. TC1 = [20-40-40]; TC2 = [20-30-50]; TC3 = [20-20-60]

A partir de los parámetros de entrada definidos, los resultados de los análisis de sensibilidad (ver Figura 15) determinan que el sistema en estudio representa un AS/RS de 5 pasillos y 3 grúas. Independientemente del escenario estudiado, esta configuración se mantiene constante dado el criterio grúa-pasillo planteado, en donde la asignación de cada grúa resulta en [1 2 3 3 3]; es decir, los dos primeros pasillos consideran grúas dedicadas, mientras que, los tres últimos, son atendidos por una única grúa.

Como se mencionó en la sección 5.4.3, los criterios planteados en las dos primeras etapas del modelo general permiten analizar el sistema como un conjunto de subsistemas independientes (uno para cada grúa). A continuación, (ver Figura 17, Figura 18 y Figura 19) se ilustran los resultados detallados para cada subsistema evaluados desde la perspectiva del tiempo de ciclo promedio de secuenciación. La Tabla 13 describe los factores de cada uno de los escenarios evaluados.

Tabla 13.
Niveles de los intervalos de experimentación.

<i>Intervalo</i>	<i>Tamaño de bloque</i>			<i>Tamaño de clase</i>			<i>Factor de ocupación</i>		
	2	4	8	20-40-40	20-30-50	20-20-60	0,55	0,7	0,85
1				x			x		
2			x				x		
3			x			x			
4						x			x
5	x								x
6				x					x
7			x						x
8					x				x
9		x			x				
10					x			x	
11			x					x	
12				x				x	
13	x							x	
14	x					x			
15	x						x		
16					x		x		
17		x					x		
18		x				x			

Figura 17.
Resultados subsistema 1

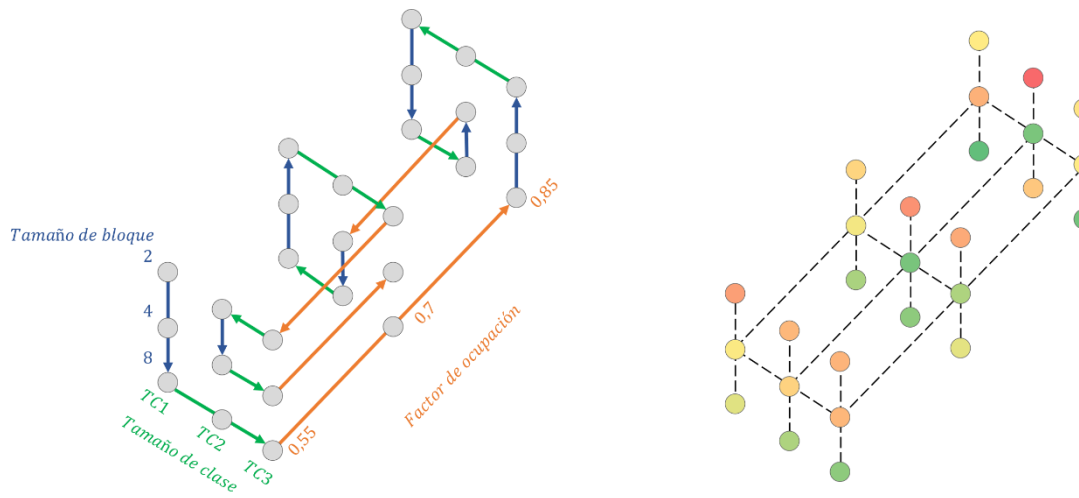
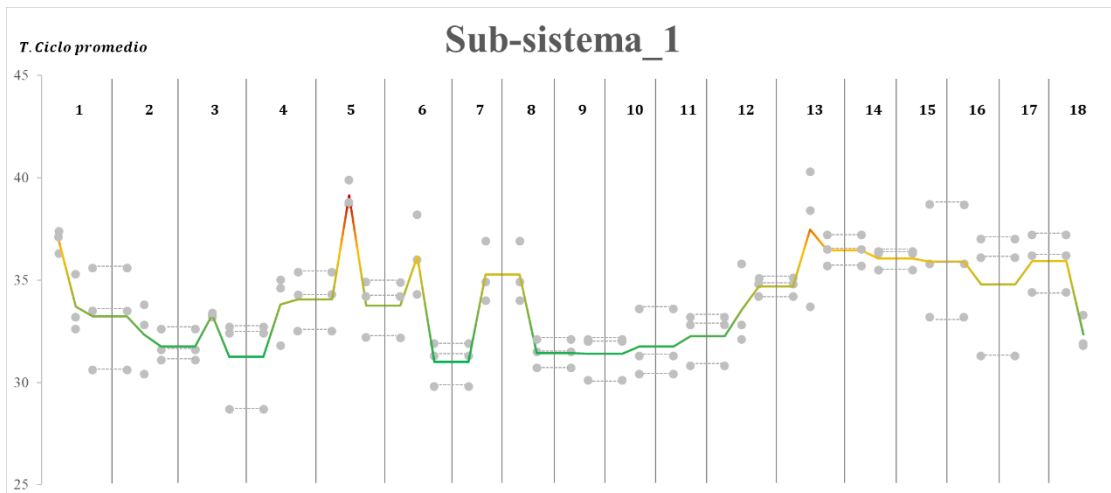
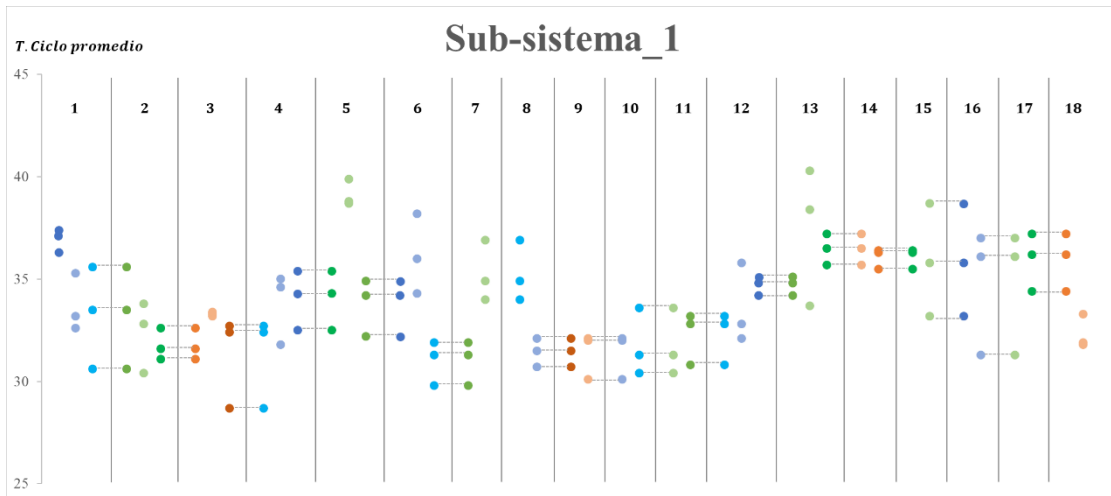


Figura 18.
Resultados subsistema 2

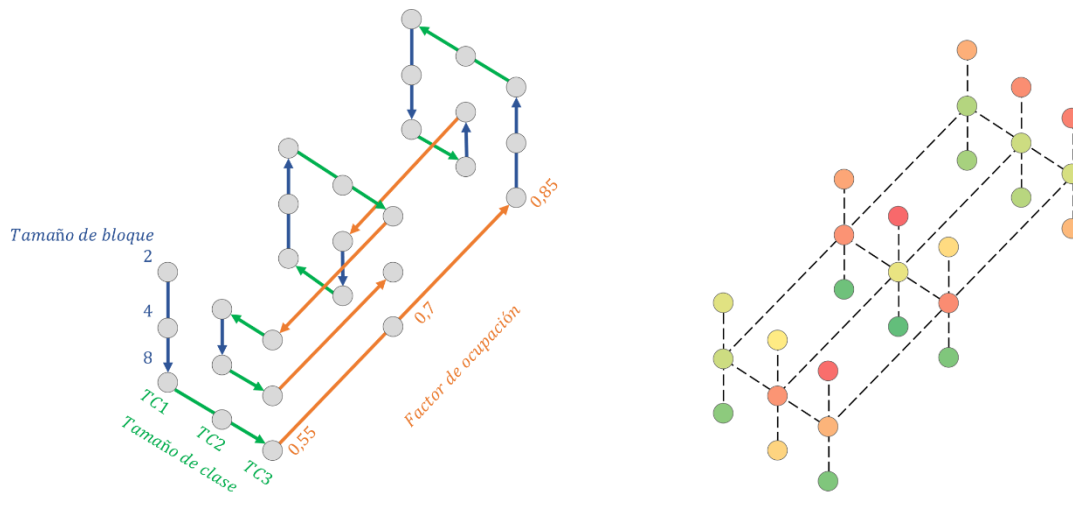
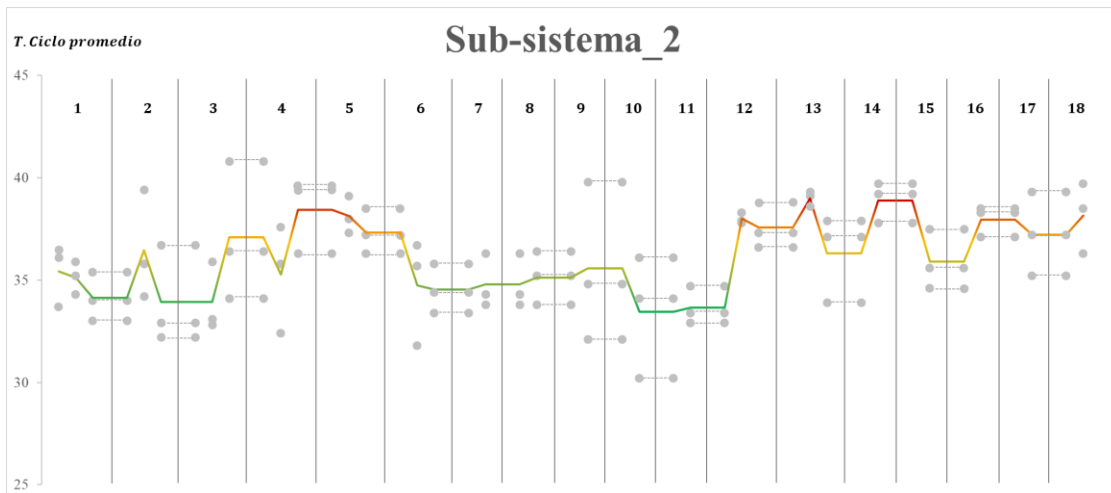
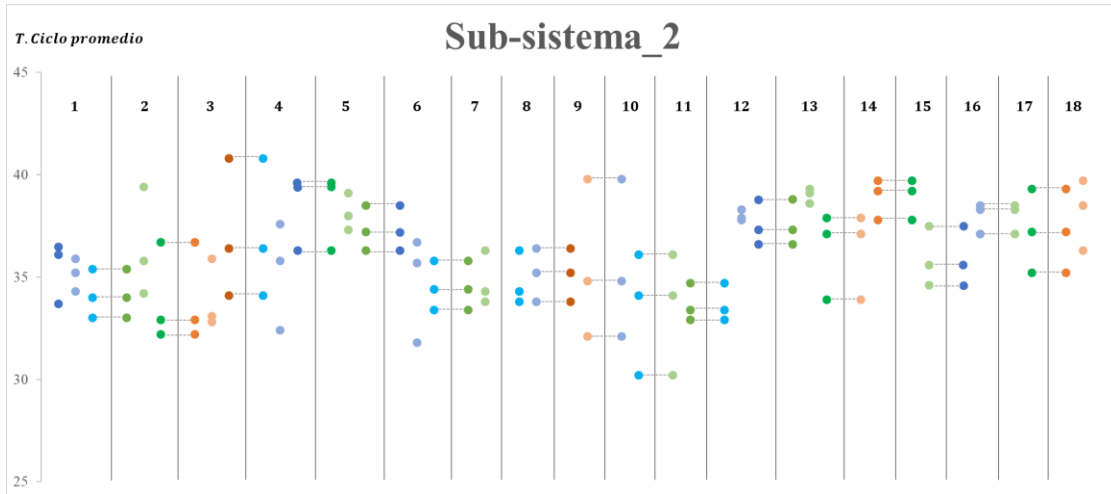
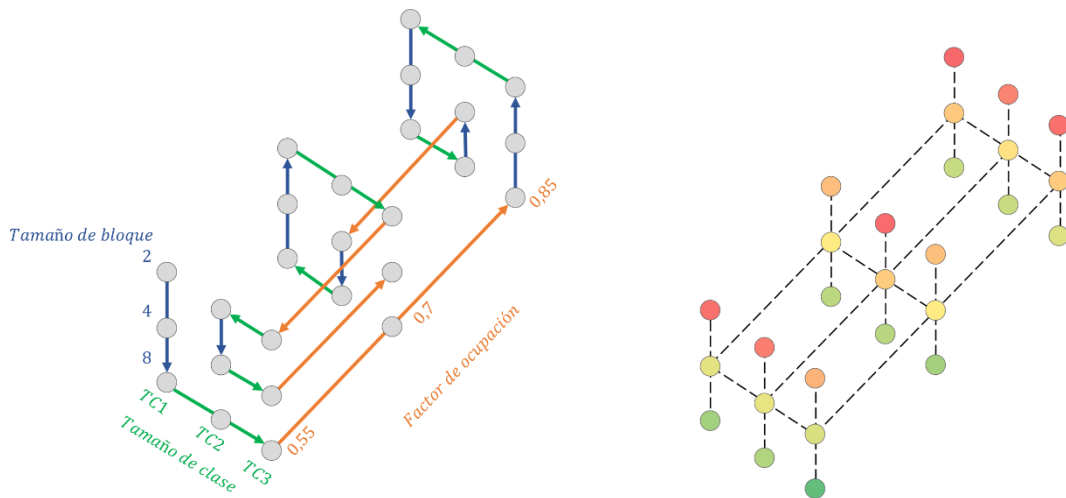
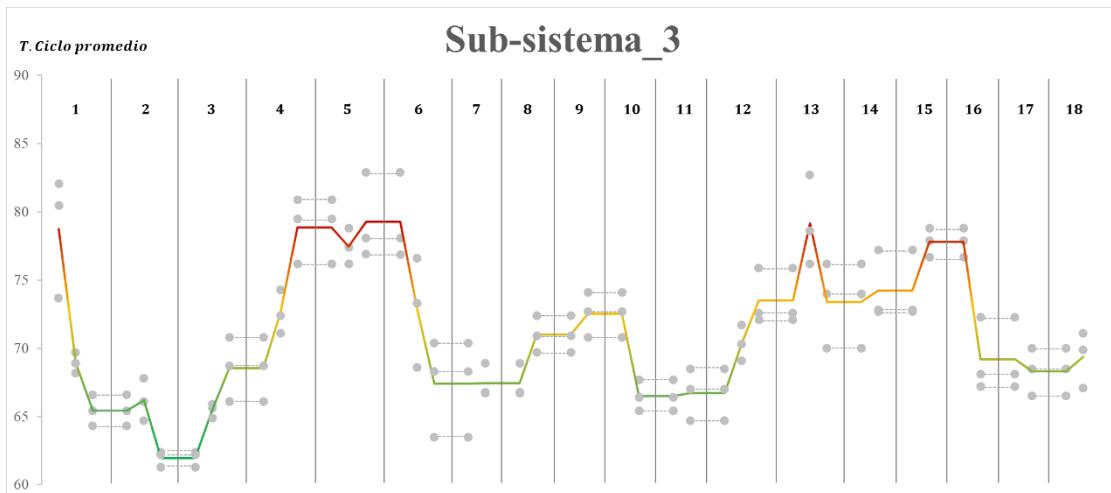
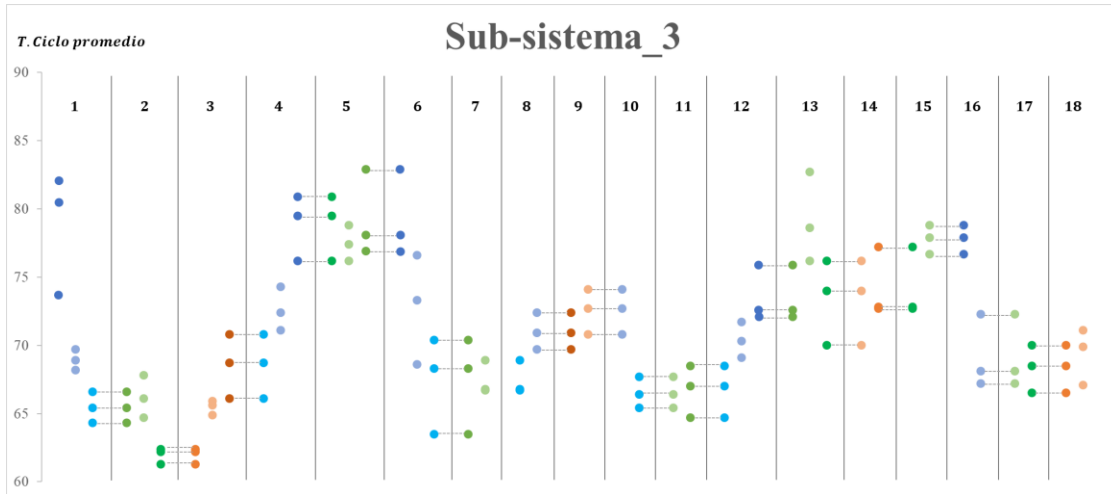


Figura 19.
Resultados subsistema 3



8. Análisis de Resultados

A partir de los obtenidos, se evidencia que, tanto en subsistemas dedicados como en los no dedicados, el factor del tamaño de bloque de secuenciación incide en el tiempo de ciclo promedio de la grúa. A mayor tamaño de bloque, menor el tiempo de ciclo; lo anterior, puede justificarse debido a que, con un bloque mayor, se cuentan con mayores posibilidades de recuperación, lo cual, permite a la grúa adaptar su secuencia a posibles ubicaciones más cercanas. Esta tendencia, es más significativa en los sistemas con grúas no dedicadas, ya que un mayor bloque permite que la grúa realice menos transferencias entre pasillos o que las ejecute estratégicamente a partir de las órdenes de almacenamiento.

Desde la perspectiva del tamaño de las clases, no existe un efecto sobre el tiempo de ciclo para ninguno de los tipos de subsistema. Sin embargo, el menor tiempo de ciclo promedio para cada subsistema se obtuvo bajo un tamaño de clase 20-20-60, por ende, se recomienda esta configuración en la política de almacenamiento.

Finalmente, el efecto del factor de ocupación del sistema resulta interesante debido a que, a mayor valor, mayores opciones de recuperación al momento de realizar la secuenciación; no obstante, un factor de ocupación alto limita las ubicaciones de almacenamiento disponibles, lo cual, podría afectar la secuencia de la ruta desde la perspectiva del tiempo de ciclo, ya que se cuenta con menos posiciones vacías en el estante. Los resultados obtenidos, no muestran una tendencia clara del efecto del factor de ocupación sobre el rendimiento de la grúa; luego, las configuraciones propuestas para las políticas de control en estudio son transversales a pesar del nivel de ocupación del sistema.

9. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación, se concluye que el estudio de los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación resulta fundamental en la gestión de almacenes no tradicionales en pro de satisfacer las necesidades dinámicas del entorno. A partir de las estrategias de modelado existentes, los tomadores de decisiones pueden representar sus sistemas objeto de estudio para su correcta gestión. Particularmente, los modelos de optimización o modelos matemáticos resultan importantes en la gestión de los AS/RS debido a que permiten optimizar sus decisiones y operaciones, elemento que resulta fundamental desde la perspectiva de automatización a la cual pertenecen este tipo de sistemas.

Adicionalmente, lo desarrollado en este estudio permite concluir que, analizar los AS/RS desde un modelo por etapas resulta favorable para la toma de decisiones. Debido a la complejidad de estos sistemas, desagregar el modelo en etapas permite analizar a detalle diferentes decisiones de diseño y control, permitiendo gestionar el almacén no solo desde la perspectiva operativa sino también, desde las decisiones tácticas y estratégicas involucradas.

Por otra parte, el estudio de sistemas multi-pasillo con grúas no dedicadas amplía las decisiones a considerar en los AS/RS no tradicionales. Se concluye que, una adecuada estrategia de asignación simplifica la gestión del sistema global debido a la generación de múltiples subsistemas independientes. No obstante, estas estrategias deben ir soportadas en las características de los ingresos y salidas de material, buscando balancear la carga de las grúas y por ende las operaciones del sistema, especialmente, si se considera almacenamiento basado en clases.

Finalmente, el desempeño de los AS/RS se ve afectado a partir de las políticas de control consideradas. En el caso del sistema objeto de estudio, se recomienda trabajar con tamaños de bloque de secuenciación altos y tamaño de clase 20-20-60, sin importar el factor de ocupación en

el que se encuentren los estantes del almacén. Para futuros trabajos, se recomienda el desarrollo de algoritmos metaheurísticos que permitan analizar sistemas con un mayor número de ubicaciones (pasillos, niveles, bahías, posiciones), al igual que la construcción de metodologías dinámicas de asignación ítem – pasillo y grúa – pasillo que puedan ser aplicadas no solo en sistemas con clasificación ABC, sino también, en sistemas con almacenamiento aleatorio.

10. Referencias

- Alnahhal, M., & Salah, B. (2022). Increasing Throughput in Warehouses : The Effect of Storage Reallocation and the Location of Input / Output Station. *Sustainability*, *14*, 1–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su14084611>
- Alnahhal, M., Salah, B., & Ruzayqat, M. (2022). An Efficient Approach to Investigate the Tradeoff between Double Handling and Needed Capacity in Automated Distribution Centers. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(13). <https://doi.org/10.3390/su14137678>
- Antomarioni, S., Lucantoni, L., Ciarapica, F. E., & Bevilacqua, M. (2021). Data-driven decision support system for managing item allocation in an ASRS: A framework development and a case study. *Expert Systems with Applications*, *185*(December 2020), 115622. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115622>
- Azzi, A., Battini, D., Faccio, M., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2011). Computers & Industrial Engineering Innovative travel time model for dual-shuttle automated storage / retrieval systems. *Computers & Industrial Engineering*, *61*, 600–607. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.04.015>
- Barbato, M., Ceselli, A., & Premoli, M. (2019). Evaluating Automated Storage and Retrieval System Policies with Simulation and Optimization. In *Advances in Optimization and Decision Science for Society, Services and Enterprises* (pp. 127–137). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34960-8_12
- Bortolini, M., Accorsi, R., Gamberi, M., Manzini, R., & Regattieri, A. (2015). *Optimal design of AS / RS storage systems with three-class-based assignment strategy under single and dual command operations*. 1747–1759. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6872-1>
- Bortolini, M., Faccio, M., Ferrari, E., Gamberi, M., & Pilati, F. (2017). Time and energy optimal

- unit-load assignment for automatic S/R warehouses. *International Journal of Production Economics*, 190, 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.07.024>
- Boysen, N., Fedtke, S., & Weidinger, F. (2018). Optimizing automated sorting in warehouses: The minimum order spread sequencing problem. *European Journal of Operational Research*, 270(1), 386–400. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.03.026>
- Bozer, Y. A., & White, J. A. (1984). Travel time models for automated storage/retrieval systems. *IIE Transactions*, 16(4), 329–338.
- Chang, S., & Egbelu, P. J. (1997). Relative pre-positioning of storage / retrieval machines in automated storage / retrieval systems to minimize maximum system response time. *IIE Transactions*, 29(4), 303–312. <https://doi.org/10.1080/07408179708966336>
- Chatchawan, N., & Kittithreerapronchai, O. (2017). Improving of an automated storage and retrieval system in a construction material retailer. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(17), 4338–4343. <https://doi.org/10.3923/jeasci.2017.4338.4343>
- Chen, W. A., Gong, Y., & Koster, R. B. M. De. (2020). Performance estimation of a passing-crane automated storage and retrieval system. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1854886>
- Dotoli, M., & Fanti, M. P. (2007). Deadlock detection and avoidance strategies for automated storage and retrieval systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, 37(4), 541–552. <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.897690>
- Ertl, R., & Günthner, W. A. (2016). Meta-model for calculating the mean energy demand of automated storage and retrieval systems |. *Logistics Journal*, 2, 9–14. <https://doi.org/10.2195/lj>
- Gagliardi, J. P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2012a). Models for automated storage and retrieval

- systems: A literature review. *International Journal of Production Research*, 50(24), 7110–7125. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.633234>
- Gagliardi, J. P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2012b). *On storage assignment policies for unit-load automated storage and retrieval systems*. 7543. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.543939>
- Gagliardi, J. P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2014a). *A simulation modeling framework for multiple-aisle automated storage and retrieval systems*. 193–207. <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0686-x>
- Gagliardi, J. P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2014b). On sequencing policies for unit-load automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 52(4), 1090–1099. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.838331>
- 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), 5876–5886. <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* (pp. 261–283). Springer, London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2274-6>
- Gao, Q., & Lu, X. (2016). The complexity and on-line algorithm for automated storage and retrieval system with stacker cranes on one rail. *Journal of Systems Science and Complexity*, 29(5), 1302–1319. <https://doi.org/10.1007/s11424-015-4197-7>
- Hahn-Woernle, P., & Günthner, W. A. (2018). Power-load management reduces energy-dependent costs of multi-aisle mini-load automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1269–1285. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1395487>

- Hausman, W. H., Schwarz, L. B., & Graves, S. C. (1976). Optimal storage assignment in automatic warehousing systems. *Management Science*, 22(6), 629–638. <https://www.jstor.org/stable/2629933>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introduction to operations research* (9th ed). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Hoshimov, A., Cagliano, A. C., Mangano, G., Schenone, M., & Grimaldi, S. (2022). AS/R system travel time in class-based storage with different input-output point levels: a proposed formula. *Journal of Facilities Management*. <https://doi.org/10.1108/JFM-11-2021-0145>
- Hsieh, S., & Tsai, K. C. (2001). A BOM oriented class-based storage assignment in an automated storage/retrieval system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17(9), 683–691. <https://doi.org/10.1007/s001700170134>
- 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>
- Kulturel, S., Ozdemirel, N. E., Sepil, C., & Bozkurt, Z. (1999). Experimental investigation of shared storage assignment policies in automated storage/retrieval systems. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 31(8), 739–749. <https://doi.org/10.1080/07408179908969873>
- Lehmann, T., & Hußmann, J. (2021). *Travel time model for multi-deep automated storage and retrieval system with a homogeneous allocation structure*.
- Lerher, T. (2006). Design and evaluation of the class-based multi-aisle AS/RS. *International Journal of Simulation Modelling*, 5(1), 25–36. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM05\(1\)3.048](https://doi.org/10.2507/IJSIMM05(1)3.048)
- Lerher, Tone, Matja, Š., & Potr, I. (2011). *Simulation analysis of mini-load multi-shuttle*

- automated storage and retrieval systems*. 337–348. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2916-8>
- Lerher, Tone, 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>
- Malmborg, C. J. (2000). Interleaving models for the analysis of twin shuttle automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*. <https://doi.org/10.1080/00207540050205532>
- Meller, R. D., & Mungwattana, A. (1997). Multi-shuttle automated storage / retrieval systems Multi-shuttle automated storage / retrieval systems. *IIE Transactions*, 29(10), 925–938. <https://doi.org/10.1080/07408179708966412>
- Meneghetti, A., Dal Borgo, E., & Monti, L. (2015). Rack shape and energy efficient operations in automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 53(23), 7090–7103. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1008107>
- Moon, G., & Kim, G. P. (2001). Effects of relocation to AS/RS storage location policy with production quantity variation. *Computers and Industrial Engineering*, 40(1–2), 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(00\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(00)00005-X)
- Ouhoud, A., Guezzen, A., & Sari, Z. (2016). Experimental validation of travel time models for multi aisle automated storage and retrieval system in class-based storage. *EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica*, 64(1), 150–157.
- Park, B. C. (1999). Optimal dwell point policies for automated storage / retrieval systems with dedicated storage. *IIE Transactions*, 31, 1011–1013. <https://doi.org/10.1080/07408179908969901>

- Park, B. C. (2001). An optimal dwell point policy for automated storage / retrieval systems with uniformly distributed , rectangular racks. *International Journal of Production Research*, 39(7), 1469–1480. <https://doi.org/10.1080/00207540010023583>
- Poquet Catala, R. (2020). Cuarta revolución industrial , automatización y afectación sobre la continuidad de la relación laboral. *Ars Iuris Salmanticensis*, 8(1), 167–183. <http://digital.casalini.it/4689318>
- Rajković, M., Zrnić, N., Kosanić, N., Borovinšek, M., & Lerher, T. (2019). A multi-objective optimization model for minimizing investment expenses, cycle times and CO2 footprint of an automated storage and retrieval systems. *Transport*, 34(2), 275–286. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.9686>
- Ramtin, F., & Pazour, J. A. (2014). *Analytical models for an automated storage and retrieval system with multiple in-the-aisle pick positions*. 8830. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2014.882037>
- Randhawa, S. U., McDowell, E. D., & Wang, W.-T. (1991). Evaluation of scheduling rules for single- and dual-dock automated storage/retrieval system. *Computers & Industrial Engineering*, 20(4), 401–410. [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(91\)90012-U](https://doi.org/10.1016/0360-8352(91)90012-U)
- Randolph, J. J. (2009). A Guide to Writing the Dissertation Literature Review. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 14. <https://doi.org/https://doi.org/10.7275/b0az-8t74>
- Regattieri, A., Santarelli, G., Manzini, R., & Pareschi, A. (2013). *The impact of dwell point policy in an Automated Storage / Retrieval System*. 7543(May). <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.776188>
- 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>

Roosbeh Nia, A., Haleh, H., & Saghaei, A. (2017). Dual command cycle dynamic sequencing method to consider GHG efficiency in unit-load multiple-rack automated storage and retrieval systems. *Computers and Industrial Engineering*, *111*(November), 89–108.

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.07.007>

Ru, B. (2016). A optimization study on irregular positions in automatic warehousing systems. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, *17*(48), 35.1-35.5.

<https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.17.48.35>

Rücker, A., Rief, J., & Fottner, J. (2020). An investigation of mean energy demand, performance and reference cycles for stacker cranes. *FME Transactions*, *48*(2), 307–312.

<https://doi.org/10.5937/FME2002307R>

Salah, B., Alnahhal, M., & Ahmad, R. (2022). Automated stacker cranes: A two-step storage reallocation process for enhanced service efficiency. *Processes*, *10*(1).

<https://doi.org/10.3390/pr10010002>

Schenone, M., Mangano, G., Grimaldi, S., & Cagliano, A. C. (2019). *International Journal of Industrial Engineering Computations*. *10*, 405–420.

<https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2018.12.002>

Tanaka, S., & Araki, M. (2009). Routing problem under the shared storage policy for unit-load automated storage and retrieval systems with separate input and output points. *International Journal of Production Research*, *47*(9), 2391–2408.

<https://doi.org/10.1080/00207540701644177>

Van Den Berg, J. P., & Gademann, A. J. R. M. (2000). Simulation study of an automated storage/retrieval system. *International Journal of Production Research*, *38*(6), 1339–1356.

<https://doi.org/10.1080/002075400188889>

- Wauters, T., Villa, F., Christiaens, J., Alvarez-Valdes, R., & Vanden Berghe, G. (2016). A decomposition approach to dual shuttle automated storage and retrieval systems. *Computers and Industrial Engineering*, *101*, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.09.013>
- Wu, K., Xu, S. S., & Wu, T. (2013). Optimal Scheduling for Retrieval Jobs in Double-Deep AS / RS by Evolutionary Algorithms. *Abstract and Applied Analysis*, *2013*. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/634812>
- Xu, X., Shen, G., Yu, Y., & Huang, W. (2015). Travel time analysis for the double-deep dual-shuttle AS/RS. *International Journal of Production Research*, *53*(3), 757–773. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.921351>
- Xu, X., Zhao, X., Zou, B., & Li, M. (2019). Optimal dimensions for multi-deep storage systems under class-based storage policies. *Cluster Computing*, *22*(3), 861–875. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-2873-9>
- Xu, X., Zou, B., Shen, G., & Gong, Y. Y. (2016). Travel-time models and fill-grade factor analysis for double-deep multi-aisle AS / RSs. *International Journal of Production Research*, *7543*, 1–19. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1106604>
- Yang, P., Miao, L., Xue, Z., & Ye, B. (2015). Variable neighborhood search heuristic for storage location assignment and storage/retrieval scheduling under shared storage in multi-shuttle automated storage/retrieval systems. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *79*, 164–177. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.04.009>

Apéndice A. Análisis Bibliométrico

Los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación fueron introducidos en los años 50. Debido a sus características de operación, estos sistemas han aumentado su participación en la industria con el paso del tiempo, de la mano de los avances tecnológicos. A mediados de la década de los 80 los AS/RS cobraron relevancia como objetos de estudio; no obstante, en el siglo presente, han demostrado un aumento significativo en su importancia, gracias al desarrollo de nuevos tipos de sistemas y a la necesidad de las nuevas industrias de implementarlos. Desde la investigación, las propuestas realizadas se han enfocado en el desarrollo de modelos y políticas que optimicen las operaciones de los AS/RS; luego, con el objetivo de describir el campo de conocimiento actual, se propone una búsqueda de los principales aportes y estudios realizados en torno a este tópico.

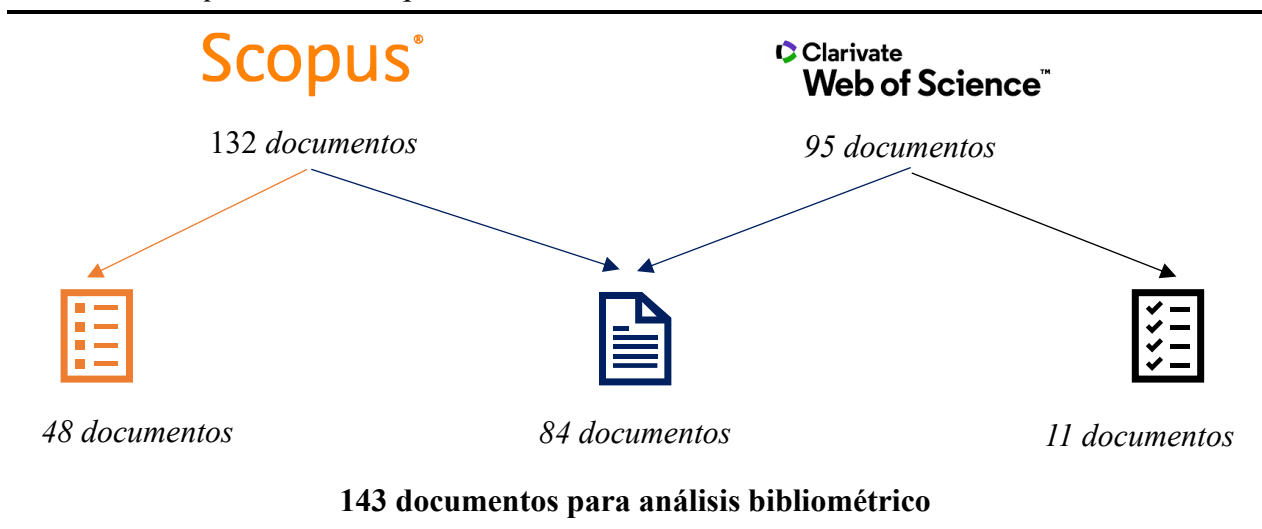
Haciendo uso de las bases de datos multidisciplinarias disponibles en la Universidad Industrial de Santander, como primer elemento se establece la ecuación de búsqueda a utilizar en cada una de las elegidas, considerando las frases y términos que asocian el objeto de investigación. La búsqueda se restringe a los campos de título, resumen o palabras clave, y mediante el uso de operadores booleanos, truncadores, comillas y paréntesis, se establece la estructura necesaria para que los trabajos encontrados pertenezcan al tópico y área de estudio. Finalmente, los resultados se delimitan por tipo de documento a capítulos de libro y artículos científicos, y por ventana de tiempo a los publicados en el siglo XXI. Solo se consideran aquellos documentos disponibles en inglés. La Figura 20 muestra las ecuaciones de búsqueda utilizadas en las bases de datos elegidas.

Figura 20.*Ecuación de búsqueda*

Scopus: (TITLE-ABS-KEY ("Automated storage and retrieval system*" OR "Automated storage/retrieval system*")) AND (TITLE-ABS-KEY ("simulation" OR (TITLE-ABS-KEY ("math* programming" OR "math* model*" OR "math* optimization" OR "math* formulation")))) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar, ch")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR, 2000-2022)) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE, "English"))

Web of Science: (TS= ("Automated storage and retrieval system*" OR "Automated storage/retrieval system*")) AND TS= (("simulation") OR ("math* programming" OR "math* model*" OR "math* optimization" OR "math* formulation")) AND LA= (English) AND DT= (Article)

De las búsquedas realizadas se encontraron 132 resultados en Scopus y 95 resultados en Web of Science; sin embargo, algunos de los registros encontrados resultan repetidos en ambas bases de datos. Considerando lo anterior, a continuación, se muestra la distribución de los documentos obtenidos (ver Figura 21).

Figura 21.*Resultados del proceso de búsqueda*

Luego de depurar los documentos repetidos, se realiza un proceso de validación de los 143 resultados disponibles mediante un análisis de coocurrencias de palabras clave (a través del

Figura 23.*Número de documentos publicados por año*

Ahora bien, gracias al reporte de citas que ofrece Web of Science, resulta importante observar el comportamiento de la cantidad de citas relacionadas con el tópico a lo largo de los años. En la Figura 24 se observa una tendencia creciente de esta métrica, permitiendo concluir que el tema en estudio resulta llamativo en la actualidad. Es importante mencionar que los documentos analizados en esta gráfica corresponden a los encontrados en la base de Web of Science. Ya que estos representan aproximadamente el 66% de los documentos totales, se toman como respaldo para concluir con respecto al objeto de estudio en general.

Figura 24.*Número de citas por año*

La Tabla 14 muestra el número de publicaciones y citaciones en función del país de origen. Resaltan China y Estados Unidos como los países con más publicaciones; mientras que, Estados Unidos y Eslovenia encabezan la lista de los países más citados. Únicamente se consideraron aquellos países con un mínimo de 5 documentos publicados.

Tabla 14.
Publicaciones y citaciones por país

<i>País</i>	<i>Documentos</i>	<i>Citaciones</i>
China	32	206
Estados Unidos	20	511
Italia	13	245
Taiwán	13	251
Alemania	10	65
Argelia	9	275
Eslovenia	9	302
Francia	8	77
Corea del Sur	8	157
Turquía	7	152
Canadá	6	150

Analizando las fuentes de los documentos, la Tabla 15 muestra el comportamiento de las 5 mejores de acuerdo con el número de publicaciones y de citaciones. Resulta importante destacar al International Journal of Production Research (Documentos: 33, Citaciones: 948) como la principal fuente en ambas métricas.

Tabla 15.
Publicaciones y citaciones por fuente

<i>Fuente</i>	<i>Documentos</i>	<i>Citaciones</i>
International Journal of Production Research	33	948
International Journal of Advanced Manufacturing Technology	10	332
Computers and Industrial Engineering	6	163
IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)	4	174
FME Transactions	4	16

Por último, la Tabla 16 muestra los 10 investigadores con más documentos publicados, así como sus citas y el año de publicación promedio. En ella, se resalta a Sari y Lerher quienes encabezan la lista desde ambas perspectivas a pesar de no ser los autores con publicaciones más antiguas, elemento que respalda el impacto de sus investigaciones.

Tabla 16.*Publicaciones y citas por autor*

<i>Autor</i>	<i>Documentos</i>	<i>Citaciones</i>	<i>Año de publicación promedio</i>
Sari Z.	12	333	2013,75
Lerher T.	10	328	2012,60
Malmborg C. J.	7	252	2004,57
Gong Y.	6	52	2019,17
Gagliardi J.-P.	5	150	2013,40
Renaud J.	5	150	2013,40
Ruiz A.	5	150	2013,40
Xu X.	5	58	2017,80
Zou b.	5	44	2018,80
Hu K. -Y.	5	62	2008,20