

**Desarrollo de una Política Alternativa de Reubicación de Unidades de Carga en un Sistema  
Automatizado de Almacenamiento y Recuperación (AS/RS) de Doble Profundidad**

**Kevin Sneider Vera Galvis**

**Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Industrial**

**Director**

**Edwin Alberto Garavito Hernández**

**Magíster en Ingeniería Industrial**

**Codirector**

**Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento**

**Magister en Ingeniería Industrial**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas**

**Escuela de Estudios Industriales y Empresariales**

**Ingeniería Industrial**

**Bucaramanga**

**2024**

### **Dedicatoria**

*A Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría necesarias para alcanzar mis metas y superar los desafíos a lo largo de este camino académico.*

*A mi madre Yesica Galvis, su apoyo incondicional y sacrificios han sido la base de todos mis logros. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia.*

### **Agradecimientos**

La culminación de esta tesis no habría sido posible sin el apoyo y la contribución de muchas personas a lo largo de este arduo camino. Es con sincero agradecimiento que quiero reconocer a todos aquellos que han sido parte de este proceso.

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por brindarme la fortaleza y la sabiduría necesarias para superar cada obstáculo y continuar hacia adelante.

A mi madre Yesica Galvis, por su amor incondicional, sus consejos sabios y por inculcarme los valores del trabajo arduo y la perseverancia. Su apoyo constante ha sido fundamental para alcanzar este logro.

A mis directores, Edwin Garavito y Edgar Córdoba, les expreso mi más profundo agradecimiento por su orientación, paciencia y por compartir su vasto conocimiento conmigo. Sus comentarios y sugerencias han sido cruciales para el desarrollo y la finalización de esta tesis.

A la profesora Laura Escobar gracias por sus consejos.

Al grupo de investigación OPALO por la asistencia en este proceso.

A todos ustedes, gracias de todo corazón.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	14
1.1. Objetivo General .....	14
1.2. Objetivos Específicos.....	14
2. Marco de Referencia .....	15
2.1. Marco de Antecedentes.....	15
2.2. Marco Teórico.....	18
2.2.1. Sistemas Automatizados de Almacenamiento y Recuperación (AS/RS).....	18
2.2.2. Descripción Conceptual del Problema de Reubicación .....	19
2.2.3. Método Heurístico.....	20
2.2.4. Esquema de un Modelo de Simulación Orientado a Objetos.....	20
3. Metodología .....	22
3.1. Definición del Problema .....	22
3.2. Formulación de la Política Alternativa .....	22
3.3. Obtención de Soluciones a Partir del Modelo.....	22
3.4. Experimentación a través del Modelo.....	23
3.5. Recopilación y Síntesis de los Resultados .....	23
4. Revisión de Literatura.....	24
4.1. Análisis Bibliométrico .....	24
4.2. Revisión Preliminar de Literatura.....	30
4.2.1. Sistemas Automatizados de Almacenamiento y Recuperación .....	30

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

4.2.2.	Modelos Analíticos .....	32
4.2.3.	Modelos de Simulación .....	32
4.2.4.	Medidas de Desempeño .....	33
4.2.5.	AS/RS de Doble Profundidad .....	34
4.2.6.	Decisiones de Control .....	34
4.2.7.	El Problema de la Reubicación .....	36
4.2.8.	Discusión de la Revisión .....	37
5.	Formulación del Método Heurístico .....	39
5.1.	Modelo Conceptual de Matrices de Priorización y Restricciones .....	39
5.1.1.	Matrices de Priorización.....	40
5.1.2.	Matrices de Restricción.....	41
5.1.3.	Operación de Matrices .....	42
5.1.4.	Supuestos del Modelo Conceptual .....	45
5.2.	Política de Reubicación Alternativa.....	46
5.2.1.	Reubicación con Minimización de Varianza .....	47
5.2.2.	Reubicación no Obstructiva con Minimización de Varianza.....	47
5.2.3.	Reubicación Aleatoria con Minimización de Varianza.....	49
5.2.4.	Reubicación Cerca al Punto de Entrada y Salida .....	49
5.2.5.	Reubicación a la Posición Libre más Cercana .....	49
6.	Formulación de un Modelo de Simulación.....	50
6.1.	Parámetros de Entrada .....	50
6.2.	Supuestos del Modelo de Simulación.....	53
6.3.	Verificación de la Herramienta de Simulación.....	54

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

7.	Experimentación a través del Modelo.....	55
7.1.	Objetivo de la Experimentación.....	55
7.2.	Descripción del Experimento.....	55
7.2.1.	Definición de Métricas.....	55
7.2.2.	Proceso de Simulación.....	56
7.2.3.	Escenarios de Simulación.....	56
8.	Análisis de Resultados.....	57
8.1.	Análisis Descriptivo de las Políticas de Reubicación.....	57
8.2.	Comparación Estadística de las Políticas de Reubicación.....	62
8.2.1.	Decisión de Pruebas Estadísticas.....	62
8.2.2.	Resultados de Evaluación de Supuestos para ANOVA.....	64
8.2.3.	Evaluación de Diferencias Significativas entre Políticas.....	65
8.2.4.	Evaluación de Eficiencia Operativa.....	67
8.3.	Resumen del Análisis.....	68
9.	Conclusiones.....	69
10.	Recomendaciones.....	71
	Referencias bibliográficas.....	72

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Elementos Básicos en un AS/RSs.....	18
Tabla 2. Cantidad de Citaciones y de Documentos Publicados por País.....	29
Tabla 3. Decisiones para el Diseño de los AS/RSs.....	31
Tabla 4. Medidas de Desempeño Estudiadas en Literatura. ....	33
Tabla 5. Decisiones para el Control de los AS/RSs.....	37
Tabla 6. Parámetros para la Simulación. ....	52
Tabla 7. Características de la Herramienta de Computo.....	54
Tabla 8. Resumen de Métricas Descriptivas.....	58
Tabla 9. Resultados de Pruebas ANOVA y Kruskal Wallis por Métricas.....	65
Tabla 10. Pruebas para Diferencias Significativas. ....	66
Tabla 11. Diferencias Relativas entre las Métricas de las Políticas de Reubicación.....	67

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. AS/RS de Doble Profundidad y Política de Almacenamiento Clasificado. ....	19
Figura 2. Principales Componentes de un AS/RS. ....	21
Figura 3. Ecuaciones de Búsqueda. ....	24
Figura 4. Resultados del Proceso de Búsqueda. ....	25
Figura 5. Diagrama de Coocurrencia de Palabras. ....	26
Figura 6. Serie Temporal de Documentos Publicados. ....	27
Figura 7. Serie Temporal de Citaciones. ....	28
Figura 8. Clasificación de los AS/RSs. ....	30
Figura 9. Matriz de Priorización de Cercanía a un Punto de Referencia. ....	40
Figura 10. Estantería Parcialmente Llena y su Matriz de Restricción. ....	41
Figura 11. Estantería Zonificada y la Matriz de Restricción para la Clase B. ....	42
Figura 12. Superposición y Enumeración de Matrices de Priorización Diferentes. ....	44
Figura 13. Estantería y su Matriz de Restricción para Reubicación no Obstructiva. ....	48
Figura 14. Distribución de las Métricas para cada Política de Reubicación. ....	57
Figura 15. Evaluación de Supuesto de Normalidad (Kolgomorov-Smirnov). ....	64
Figura 16. Evaluación del Supuesto de Homocedasticidad (Levene). ....	64

**Lista de Apéndices**

Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS

Apéndice A. Diagramas de Flujo de Operaciones de Almacenamiento y Recuperación.

Apéndice B. Herramienta de Simulación (Programa Python).

Apéndice C. Resultados de Simulación.

Apéndice D. Procesamiento de los Resultados de Simulación.

Apéndice E. Artículo Publicable.

## Resumen

**Título:** Desarrollo de una Política Alternativa de Reubicación de Unidades de Carga en un Sistema Automatizado de Almacenamiento y Recuperación (AS/RS) de Doble Profundidad.<sup>1</sup>

**Autor:** Kevin Sneider Vera Galvis.<sup>2</sup>

**Palabras Clave:** AS/RS, doble profundidad, política de reubicación, heurística, sistemas automatizados de almacenamiento.

### Descripción:

Este trabajo aborda el desarrollo de una política alternativa de reubicación de unidades de carga en un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación (AS/RS) de doble profundidad. Estos sistemas son cruciales para la gestión de inventarios en la Industria 4.0 debido a sus altos niveles de automatización y eficiencia. Sin embargo, los AS/RS enfrentan desafíos significativos relacionados con la reubicación de unidades de carga, particularmente cuando una unidad bloquea el acceso a otra, lo que lleva a un aumento en los tiempos de operación. A través de la revisión de la literatura, se identificaron las limitaciones de las políticas de reubicación existentes, incluyendo factores adicionales como las listas de recuperación.

La política propuesta se desarrolla basándose en un modelo conceptual que permite modelar con precisión los criterios de reubicación. Este modelo tiene como objetivo reducir la ambigüedad presente en las definiciones de las políticas. La validación de esta nueva política se lleva a cabo mediante simulaciones comparativas con políticas existentes, utilizando escenarios derivados de la literatura. Las simulaciones demuestran que las políticas más sencillas, en términos de criterios, tienden a ser más eficientes. Además, se encontró que incorporar listas de recuperación no es beneficioso.

Los hallazgos concluyen que la elección de la política de reubicación impacta significativamente los tiempos operativos, convirtiéndola en un proceso crítico para la eficiencia de las operaciones de AS/RS. Esta investigación proporciona un marco para evaluar e implementar estrategias de reubicación más efectivas, mejorando potencialmente el rendimiento y la fiabilidad general de los sistemas de almacenamiento automatizado en aplicaciones industriales. Los conocimientos obtenidos de este estudio pueden guiar futuros desarrollos en políticas de reubicación, contribuyendo a los avances en la optimización de los sistemas de logística y gestión de inventarios.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Grado

<sup>2</sup> Facultad Fisicomecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director, Edwin Alberto Garavito Hernández. Codirector, Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento

**Abstract**

**Title:** Development of an Alternative Relocation Policy for Load units in a Double-deep Automated Storage and Retrieval System (AS/RS).<sup>1</sup>

**Author:** Kevin Sneider Vera Galvis.<sup>2</sup>

**Key Words:** AS/RS, double-deep, relocation policy, heuristic, automated storage systems.

**Description:**

This work addresses the development of an alternative relocation policy for load units in a double-deep automated storage and retrieval system (AS/RS). These systems are crucial for inventory management in Industry 4.0 due to their important levels of automation and efficiency. However, AS/RS face significant challenges related to the relocation of load units, particularly when one unit blocks access to another, leading to increased operation times. Through a literature review, the limitations of existing relocation policies were identified, including additional factors such as retrieval lists.

The proposed policy is developed based on a conceptual model that allows for precise modeling of relocation criteria. This model aims to reduce the ambiguity found in the definitions of the policies. Validation of this new policy is conducted through comparative simulations with existing policies, using scenarios derived from literature. The simulations demonstrate that simpler policies, in terms of criteria, tend to be more efficient. Additionally, it was found that incorporating retrieval lists is not beneficial.

The findings conclude that the choice of relocation policy significantly impacts operational times, making it a critical process in the efficiency of AS/RS operations. This research provides a framework for evaluating and implementing more effective relocation strategies, potentially improving the overall performance and reliability of automated storage systems in industrial applications. The insights gained from this study may guide future developments in relocation policies, contributing to advancements in the optimization of logistics and inventory management systems.

---

<sup>1</sup> Bachelor Thesis

<sup>2</sup> Facultad Fisicomecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director, Edwin Alberto Garavito Hernández. Codirector, Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento

## Introducción

Los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS) permiten almacenar y recuperar unidades de carga de forma efectiva, utilizando grúas automatizadas que se desplazan por estanterías estáticas. Estos sistemas se han convertido en una solución importante para la gestión de inventarios y materiales, especialmente en el contexto de la Industria 4.0, donde se requiere alta automatización y flexibilidad. Sin embargo, los AS/RS también presentan desafíos y problemas que deben ser abordados para optimizar su diseño y operación. Uno de estos problemas es la reubicación, que ocurre cuando se necesita acceder a una unidad de carga que está bloqueada por otra en una estantería de doble profundidad. Este problema implica un aumento del tiempo de viaje y del consumo energético de las grúas, así como una disminución del nivel de servicio.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una política alternativa de reubicación de unidades de carga en un AS/RS de doble profundidad, que minimice el tiempo de operación como medida de desempeño. Para ello, se realiza una revisión de la literatura existente sobre el tema, luego se propone formular un modelo heurístico que considere las listas de recuperación, para después contrastar la política propuesta con otras políticas de reubicación mediante alguna instancia derivada de la literatura. Se espera que este trabajo aporte a la mejora de los procesos de almacenamiento y recuperación en los AS/RS, así como a la generación de nuevas líneas de investigación en el campo de la optimización y la organización de sistemas productivos, administrativos y logísticos.

**Tabla de Cumplimiento de Objetivos**

<b>Objetivo Específico</b>	<b>Cumplimiento</b>
<b>1. Caracterizar el problema de investigación a partir de una revisión de literatura, definiendo el sistema objeto de estudio y las políticas de reubicación existentes.</b>	Sección 2.2. Marco Teórico (página 18-21) Sección 4.2. Revisión Preliminar de Literatura (página 30-38)
<b>2. Formular una política de reubicación alternativa, considerando factores que aún no han sido involucrados en las políticas de reubicación existentes.</b>	Sección 5.2.1. Reubicación no Obstructiva con Minimización de Varianza (página 47)
<b>3. Contrastar las políticas de reubicación existentes y la política alternativa, desde la perspectiva del tiempo de operación como medida de desempeño.</b>	Sección 7.2.3. Escenarios de Simulación (página 56) y Sección 8. Análisis de Resultados (página 57-68)
<b>4. Elaborar un artículo de carácter publicable con base en los resultados obtenidos en la investigación.</b>	Apéndice E. Artículo Publicable

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Desarrollar una política alternativa de reubicación de unidades de carga en un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación (AS/RS) de doble profundidad, desde la perspectiva del tiempo de operación como medida de desempeño.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar el problema de investigación a partir de una revisión de literatura, definiendo el sistema objeto de estudio y las políticas de reubicación existentes.
- Formular una política de reubicación alternativa, considerando factores que aún no han sido involucrados en las políticas de reubicación existentes.
- Contrastar las políticas de reubicación existentes y la política alternativa, desde la perspectiva del tiempo de operación como medida de desempeño.
- Elaborar un artículo de carácter publicable con base en los resultados obtenidos en la investigación.

## 2. Marco de Referencia

### 2.1. Marco de Antecedentes

Se realizó una búsqueda exploratoria en los repositorios de las principales universidades de Colombia y en Google Académico con el propósito de identificar trabajos de investigación relevantes a nivel nacional. Como resultado de esta búsqueda, se encontraron siete documentos relacionados. De estos documentos, seis son tesis de pregrado y uno es una tesis de maestría. A continuación, se presenta una síntesis de los documentos.

García-Herreros et al. (2005), en su tesis de pregrado, presentan el proceso de diseño y manufactura de un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación (AS/RS) usando principios mecatrónicos, con el fin de que sea una representación de los diseños industriales. El diseño del sistema pasa por varias etapas, incluyendo el diseño inicial, el montaje, el rediseño y la puesta en marcha del sistema mecatrónico. Una vez finalizado el diseño, se valida mediante su fabricación. Es importante destacar que los autores, en la etapa de diseño, no profundizan sobre las decisiones de control en el sistema; sin embargo, cualquier decisión de control podría ser considerada si se implementa el algoritmo correspondiente y se cumplen las condiciones técnicas. Además, la manufactura de estos sistemas a escala puede considerarse como una herramienta que apoya procesos de simulación y evaluaciones de diseño. Desde la misma perspectiva Godoy & Rodríguez (2007), así como Bahos & Blanco (2019), han desarrollado diseños de un sistema AS/RS con aplicaciones reales. Sin embargo, estos estudios no profundizan en las decisiones de control, limitándose a considerar el almacenamiento dedicado. Esta limitación podría estar relacionada con el hecho de que los sistemas que describen los autores son de una escala de uso reducida y, por lo tanto, no requieren de sistemas de control complejos.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

Laurence et al. (2013), su proyecto representa un aporte significativo en la automatización de los sistemas de almacenamiento y recuperación (AS/RS), utilizando la visión artificial para el reconocimiento de imágenes y la actualización de inventarios. Aunque el reconocimiento de imágenes no obtuvo una precisión completa, se identificaron las causas, tales como el contraste insuficiente entre los materiales y el palet, que limitaron la precisión. Sin embargo, la implementación de este sistema ha demostrado ser beneficiosa, reduciendo los tiempos de recolección y los costos asociados con los errores. Este proyecto destaca la importancia de la automatización en la ingeniería industrial y sugiere que futuras investigaciones podrían centrarse en mejorar el contraste entre los materiales y el palet para aumentar la precisión del reconocimiento de imágenes.

En su trabajo de grado, Estrada et al. (2019) presentan un modelo de control predictivo-reactivo para almacenes automatizados con el objetivo de maximizar el nivel operativo y el tiempo de utilización de los AGVs. Para crear el sistema de control, se emplearon herramientas de optimización como metaheurísticas y heurísticas que permiten encontrar una eficiente asignación de tareas de recuperación a los AGVs. Además, se usó una arquitectura de control distribuido que facilita la resolución de las respuestas reactivas a situaciones complejas y perturbaciones, generando soluciones casi de forma instantánea. Los autores validaron el modelo mediante un caso de estudio en el que se encontró que los resultados del modelo predictivo-reactivo presentan una variación mínima con respecto al modelo matemático, demostrando así la factibilidad de considerar un modelo reactivo-predictivo para aumentar la eficiencia y la reactividad de los tiempos de recolección en los AS/RSs.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

Un trabajo similar al anterior fue realizado por Rolando et al. (2020), donde se evalúa el funcionamiento de un modelo predictivo-reactivo considerando una configuración de gemelo digital. Según los autores, esto consiste en una representación digital de un sistema físico siguiendo la máxima fidelidad posible, con el fin de que sirva de control adicional para la generación de instrucciones de los AGVs en el entorno físico. Sin embargo, reportan limitaciones relacionadas al modelo, como que el aumento en la cantidad de AGVs considerado no puede superar el número propuesto o el sistema reactivo-predictivo no podrá prevenir en su totalidad las colisiones.

Finalmente, se identifica un documento de nivel de maestría, desarrollado por Córdoba et al. (2023), que propone un modelo matemático para representar las operaciones de secuenciación y asignación de ubicaciones en un almacén automatizado. El autor define la configuración del sistema como estanterías discretas de profundidad simple y sus pasillos respectivos, con una política de almacenamiento basada en clases, entre otros supuestos que fundamenta en la literatura. Además, explica el proceso de construcción del modelo matemático, en primera instancia define un criterio de asignación ítem-pasillo, que se basa en una evaluación relativa de la demanda entre los niveles de clase; luego, se evalúan diferentes alternativas de asignación y se calcula el índice de ponderación para cada una, con el fin de estimar el costo asociado. La segunda etapa consiste en definir un modelo matemático para las operaciones de secuenciación y asignación de ubicaciones, que tiene en cuenta las restricciones y los objetivos del problema; el autor destaca que esta etapa es más compleja que la anterior, por lo que resulta conveniente desagregar el modelo en subsistemas. De ahí que una de las conclusiones del estudio sea que, analizar los AS/RSs desde un modelo por etapas resulta favorable para la toma de decisiones.

## 2.2. Marco Teórico

### 2.2.1. *Sistemas Automatizados de Almacenamiento y Recuperación (AS/RS)*

Los AS/RSs son sistemas totalmente automatizados y controlados por computadora, con grúas apiladoras de trayectoria fija, también llamadas máquinas de almacenamiento y recuperación (*S/R machines*), que sirven a una estantería de almacenamiento estático. (Dörr, 2018). A continuación, se listan algunos elementos identificables en un AS/RS, (Ver tabla 1).

**Tabla 1.**

*Elementos Básicos en un AS/RSs.*

<b>Elementos</b>	<b>Descripción</b>
<b>Bahías</b>	Cantidad de divisiones de almacenamiento horizontales
<b>Canal</b>	Ubicación de almacenamiento, su capacidad depende la profundidad de la estantería
<b>Estantería</b>	Es la estructura física en donde se disponen las unidades de carga
<b>Maquina S/R</b>	Es el agente que se encargar del almacenamiento y recuperación de las unidades de carga
<b>Niveles</b>	Cantidad de divisiones de almacenamiento verticales
<b>Profundidad</b>	Determina la cantidad de unidades de carga que pueden ser apiladas en un canal
<b>Punto E/S</b>	Posición de entrada y salida de las unidades de carga
<b>Ubicación de Almacenamiento</b>	Determina una posición individual en la estantería, la cual puede presentar dos estados, vacía u ocupada

Ahora bien, según Dörr (2018), una estantería de doble profundidad es aquella en la que dos ubicaciones de almacenamiento se apilan una frente la otra, resultando en dos planos de almacenamiento, también se destaca la necesidad de que la máquina de carga cuente con un sistema que le permita alcanzar las dos posiciones.

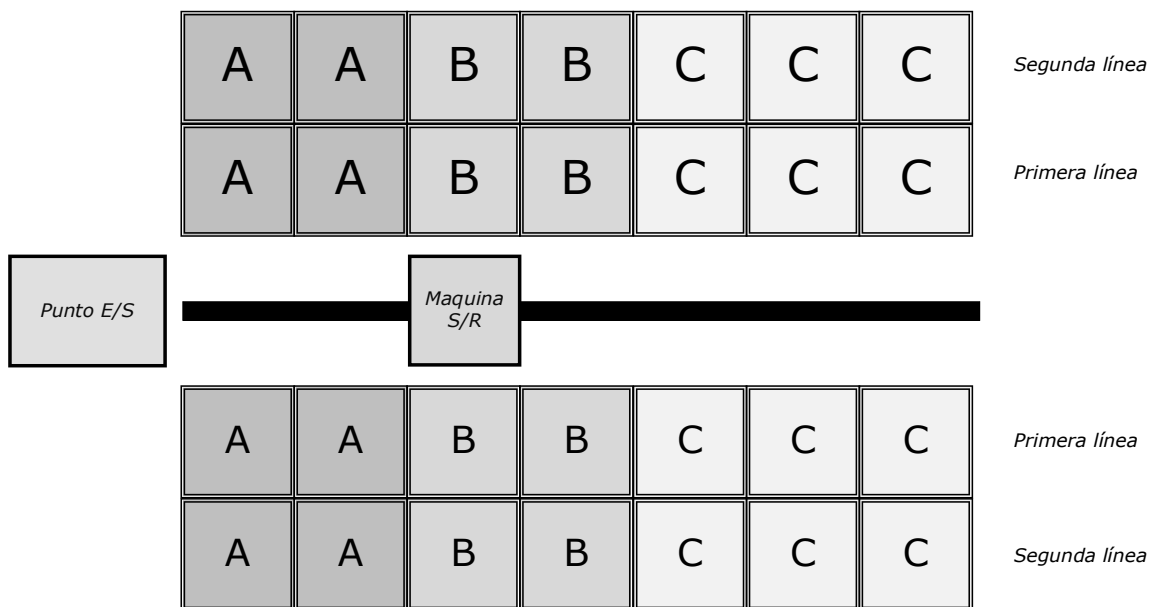
POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

Luego, de acuerdo con Mazini et al. (2006) la política de almacenamiento basada en clase se basa en establecer ubicaciones predeterminadas para cada clase, pero siguiendo la condición de que los elementos de mayor rotación deberán se ubicados cerca a el punto de entrada y salida de material. Heskett (1963) define el índice *cube per order* el cual permite determinar la ubicación de los productos.

En la figura 1, se representa esquemáticamente, el concepto de un AS/RS de doble profundidad, desde una vista superior, con una política de almacenamiento basada en clases.

**Figura 1.**

*AS/RS de Doble Profundidad y Política de Almacenamiento Clasificado.*



**2.2.2. Descripción Conceptual del Problema de Reubicación**

De acuerdo con Lerher et al. (2010), el problema de reubicación tiene lugar cuando se requiere recuperar una carga de la segunda línea de almacenamiento, mientras que en la primera línea hay una unidad de carga que obstaculiza el acceso. Adicionalmente, Lerher et al. (2010) resalta las implicaciones con el nivel de ocupación del sistema y las estrategias de almacenamiento.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

Luego, Xu et al. (2015), realizan un análisis de tres políticas de reubicación, la primera política consiste en devolver la carga al punto de entrada y salida de material, la segunda política consiste en mover la carga a una posición libre elegida al azar, y la tercera política consiste en aplicar la heurística del vecino más cercano, que consiste en mover la carga a la posición libre más próxima a la carga obstáculo.

Ahora bien, según Lerher et al. (2010) el factor de ocupación se define como la relación entre el número de ubicaciones de almacenamiento ocupadas y el número total de ubicaciones en el sistema. En su estudio establece que mientras el factor de ocupación del sistema sea mayor que 0.5, se suprime la posibilidad de realizar reubicaciones.

### ***2.2.3. Método Heurístico***

De acuerdo con Hillier & Lieberman (2010), una heurística consiste en aplicar un método o una técnica que se basa en la experiencia, el conocimiento y el razonamiento para resolver problemas de forma práctica, creativa e intuitiva, sin garantizar que la solución sea la mejor o la óptima. La heurística se usa cuando el problema es complejo, el tiempo es limitado o no se dispone de toda la información necesaria. La heurística puede ayudar a encontrar soluciones rápidas y satisfactorias, pero también puede generar errores o sesgos.

### ***2.2.4. Esquema de un Modelo de Simulación Orientado a Objetos***

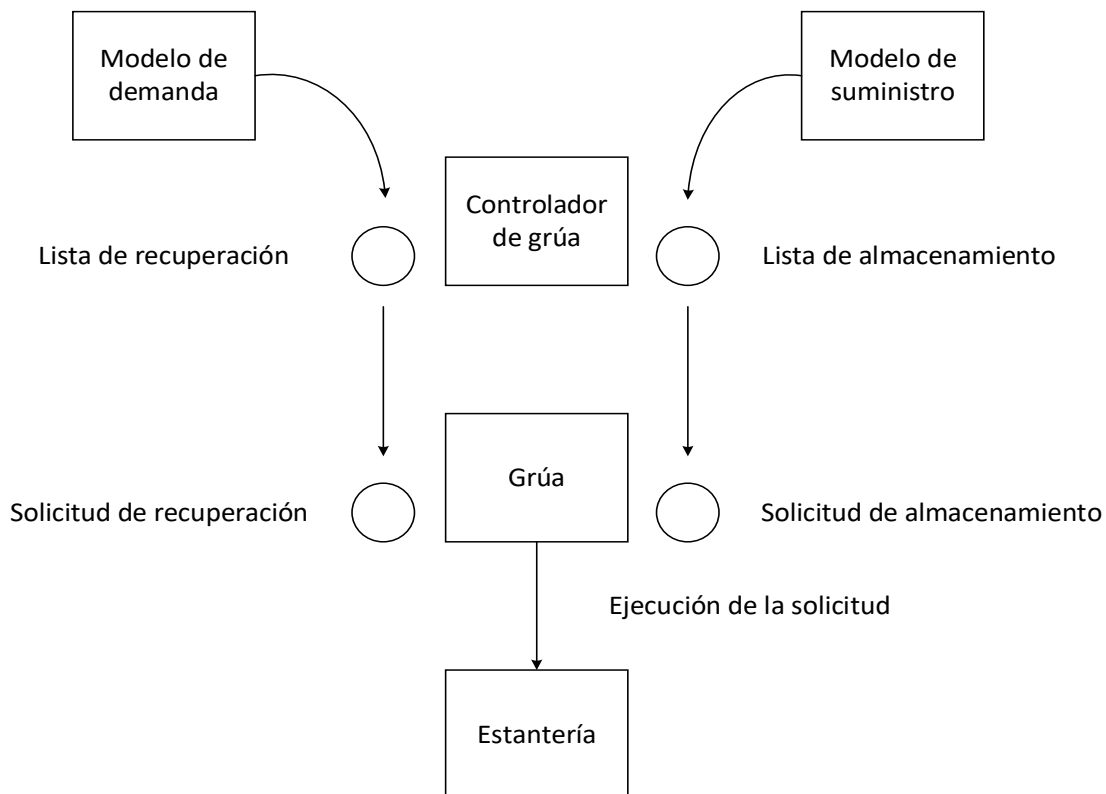
Gagliardi et al. (2014) establecen un modelo de simulación orientado a objetos de eventos discretos. Según el autor, el uso de estos modelos es conveniente cuando se consideran elementos estocásticos. Luego, el autor describe los elementos básicos del modelo. En primer lugar, se tiene el modelo de demanda y suministro, el cual se comunica con el controlador de grúa. A su vez, este controlador envía la solicitud, ya sea de almacenamiento o recuperación, a la grúa, la cual se

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

encarga de ejecutar la solicitud, modificando el estado de la estantería. La figura 2 es una adaptación del modelo propuesto por Gagliardi et al. (2014).

**Figura 2.**

*Principales Componentes de un AS/RS.*



*Nota.* Adaptado de Gagliardi et. al (2014).

### **3. Metodología**

En esta sección se describen los métodos utilizados para llevar a cabo el estudio propuesto. El problema de la reubicación puede ser catalogado como de investigación de operaciones (IO). Se toman como base las fases propuestas por los autores Hillier & Lieberman (2010) y Taha (2017) para abordar este estudio.

#### **3.1. Definición del Problema**

En esta fase se definirán los elementos característicos de un AS/RS de doble profundidad, y las decisiones de control asociadas al problema de reubicación. Para ello se propone realizar una revisión de literatura.

Luego, con base en la literatura se establece la configuración característica de un AS/RS de doble profundidad y sus decisiones de control.

Además, en la literatura se deberá identificar modelos que permitan determinar el desempeño del sistema objeto de estudio.

#### **3.2. Formulación de la Política Alternativa**

Dada la naturaleza del problema, para su estudio se propone el diseño de un método heurístico. Para su formulación, se deberá definir un criterio de reubicación, que involucre el tiempo de operación como medida de desempeño.

#### **3.3. Obtención de Soluciones a Partir del Modelo**

Para este paso se propone realizar la codificación del algoritmo en lenguaje de programación, en este caso la implementación se realizará en Python, siguiendo el paradigma de

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

programación orientada a objetos (POO), para ello se definirá la estructura de objetos con base en lo establecido por Gliardi et al. (2014).

Para ello, se elaborarán los diagramas de flujo correspondientes al modelo alternativo y transcripciones a pseudocódigo según se requiera, esto con el fin de facilitar la transcripción del modelo a lenguaje de máquina.

La validación del código se realizará de forma simultánea a la escritura de este.

### **3.4. Experimentación a través del Modelo**

Luego, se propone evaluar el tiempo de operación de algunas de las políticas de reubicación mencionadas en literatura, haciendo la comparación con la política alternativa propuesta.

### **3.5. Recopilación y Síntesis de los Resultados**

Durante el desarrollo de la investigación, se deberán consignar dos registros literales de su elaboración. El primero, en la naturaleza de tesis de grado, y el segundo en forma de artículo académico de carácter publicable.

#### 4. Revisión de Literatura

##### 4.1. Análisis Bibliométrico

En el análisis bibliométrico de la literatura asociada al problema de investigación, se pudo identificar que el número de artículos en torno al tópico es reducido; sin embargo, la cantidad de publicaciones ha venido aumentando. Además, el impacto de los documentos es alto, lo cual se evidencia por la frecuencia en que son citados.

Con el objetivo de describir el campo del conocimiento actual, se propone una búsqueda de los principales aportes y estudios realizados en torno a las políticas de reubicación, en AS/RS de doble profundidad.

Se establece como recurso, la bases datos Scopus y Web of Science disponibles en la Universidad Industrial de Santander. Luego se define las ecuaciones de búsqueda a utilizar, relacionando cada uno de los términos e ideas clave. Ahora bien, la búsqueda se restringe a los campos de título y palabras clave; con el fin de demarcar los resultados se establece una combinación de operadores lógicos. Finalmente, los resultados se clasifican, según el tipo de documento, y su marca temporal. (Ver figura 3).

##### Figura 3.

*Ecuaciones de Búsqueda.*

---

**Scopus:** TITLE-ABS-KEY ("Automated storage and retrieval system\*" OR "Automated storage/retrieval system\*") AND TITLE-ABS-KEY ("double-depth" OR "double-deep")

**Web of Science:** (TS= ("automated storage and retrieval system\*" OR "Automated storage/retrieval system\*")) AND (TS = (double deep))

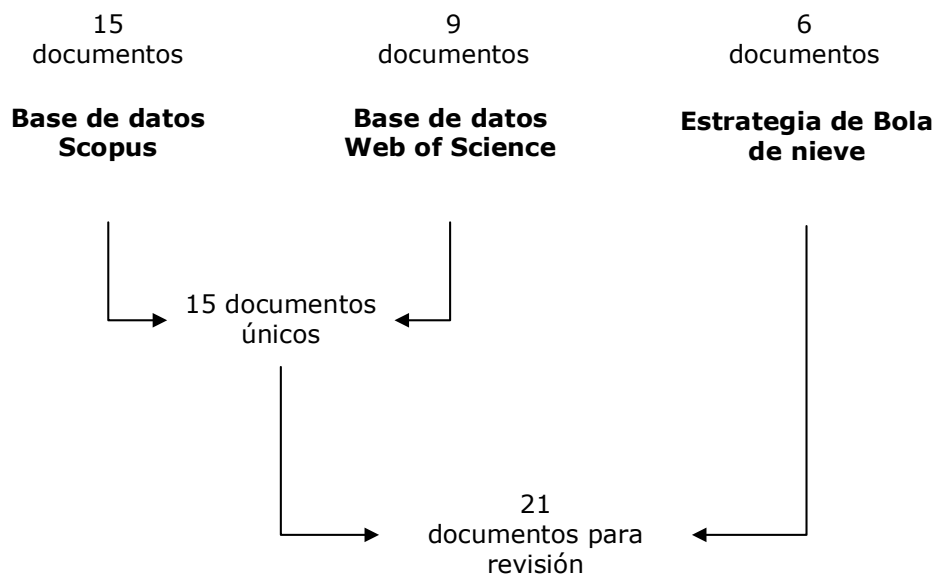
---

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

Se realizó la búsqueda y se encontraron 15 resultados en Scopus y 9 en la base de datos Web of Science; Sin embargo, se detectó la coexistencia de documentos, resultando en un total de 15 resultados únicos. La mayoría de los resultados provienen de la base de datos Scopus. En este punto, se puede realizar un primer análisis. Dado que el número de documentos encontrados es reducido, se recurrió a la técnica de bola de nieve con el fin de establecer una base bibliográfica robusta. Para ello, se consideró únicamente el top 3 de documentos con más citas encontrados en la primera búsqueda. Se seleccionaron no más de dos referencias anidadas, ya que se encontró que el resto de las referencias no se relacionaban directamente con el tema de estudio. El proceso de búsqueda se puede ver representado en la figura 4.

### Figura 4.

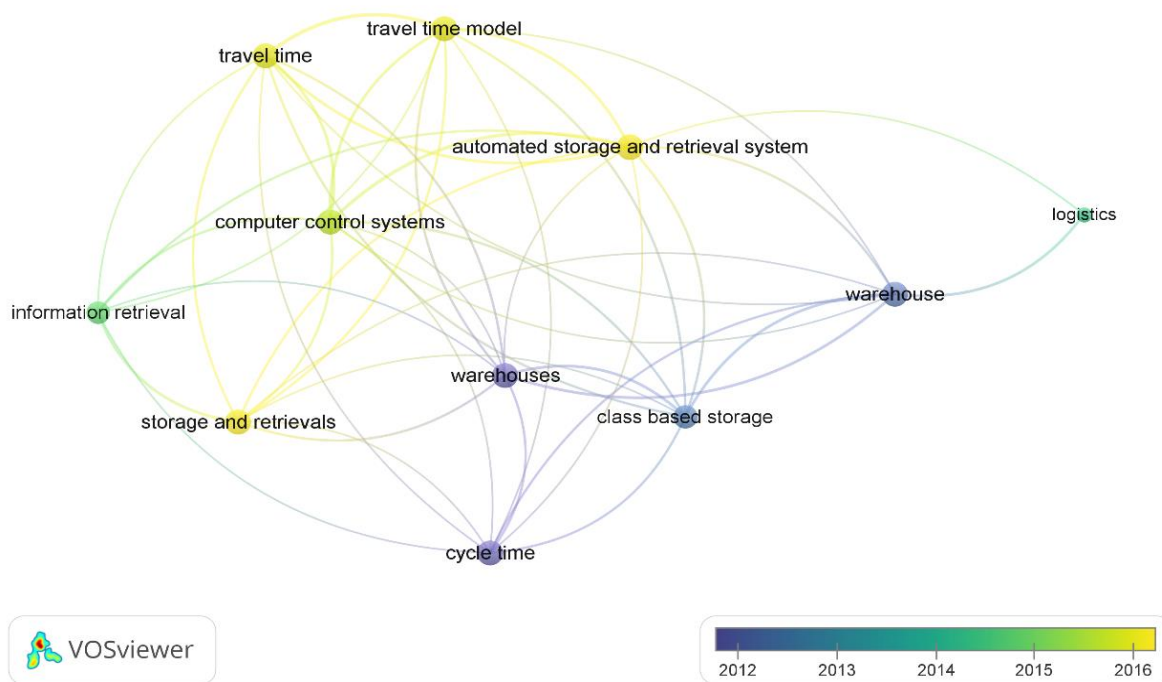
*Resultados del Proceso de Búsqueda.*



Luego, con el fin de validar los documentos se realiza un análisis de coocurrencias de palabras clave (a través del software VOSviewer). Con una frecuencia mínima de tres coocurrencias, se genera la figura 5.

**Figura 5.**

*Diagrama de Coocurrencia de Palabras.*



El diagrama proporciona una identificación clara de las relaciones entre las palabras clave. Adicionalmente, la convención de tiempo ilustra la evolución de la perspectiva desde la cual se estudió el tópico central. Se identifican como palabras clave principales “sistemas de control computarizados” y “almacenes”, lo que sugiere una relación con la investigación actual. Además, estas palabras clave principales muestran una relación estrecha con “sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación”, proporcionando una delimitación adicional que nos acerca al tema de interés.

En términos temporales, las palabras “almacén”, “tiempo de ciclo” y “almacenamiento basado en clase” tuvieron la mayor coocurrencia en 2012 y 2013. En 2014 y 2015, los temas centrales fueron “sistemas de control computarizados”, “logística” y “recuperación de

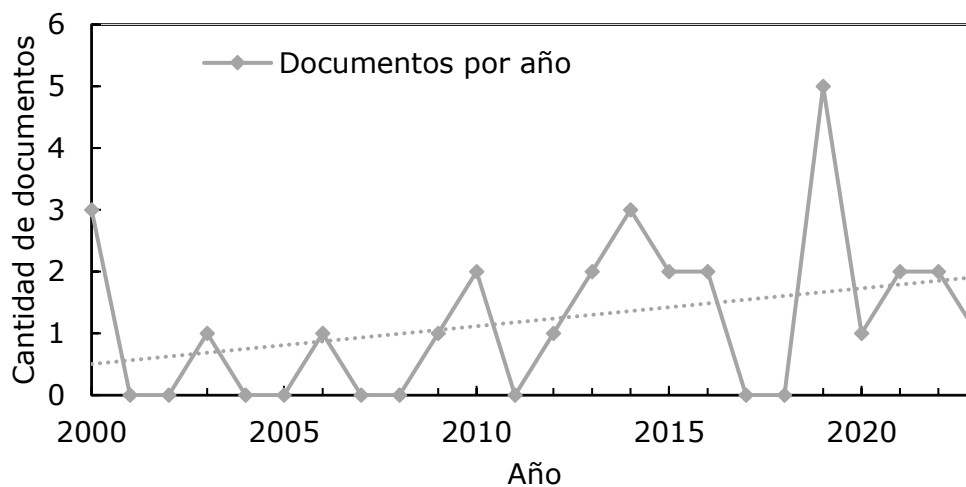
## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

información”. En 2016, el modelo de tiempo de viaje ganó relevancia. Para años posteriores el análisis no arrojó coocurrencias importantes. Esta evolución temporal de las palabras clave proporciona una visión dinámica de cómo ha cambiado el enfoque de la investigación a lo largo del tiempo.

Luego, se realizó un análisis de la cantidad de documentos publicados, con el fin de describir la evolución y desarrollo de lo relacionado al tópico. La serie de datos proporcionada refleja la cantidad de documentos publicados anualmente desde antes del 2000 hasta 2023. Se observa que hubo 3 documentos publicados antes del 2000, seguidos por algunos años sin publicaciones. El año con la mayor cantidad de publicaciones fue 2019, con 5 documentos. En los años más recientes (2020 a 2023), la cantidad de publicaciones ha sido relativamente constante, oscilando entre 1 y 2 documentos por año. De forma general la cantidad de documentos publicados muestra una tendencia creciente, lo cual puede significar un mayor interés alrededor del tópico. (Ver figura 6).

**Figura 6.**

*Serie Temporal de Documentos Publicados.*

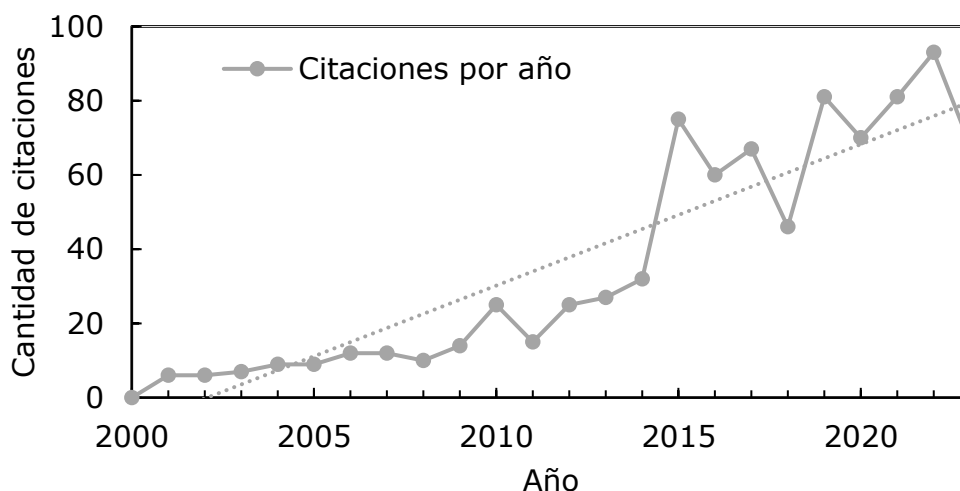


## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

Con el objetivo de comprender la relevancia y el alcance de los documentos recopilados, se utilizan los informes de citas por año proporcionados por Scopus y Web of Science. (Ver figura 7).

**Figura 7.**

*Serie Temporal de Citaciones.*



El análisis de las citas por año, desde el año 2000 hasta 2005, se observa un incremento constante en el número de citas, lo que se puede asociar con un creciente interés en el campo de estudio. Sin embargo, el crecimiento es relativamente lento, con un aumento de solo 9 citas en un período de 5 años. A partir de 2006, el número de citas comienza a aumentar a un ritmo rápido, alcanzando un pico de 75 citas en 2015. Esto sugiere que, durante este período, la investigación en el campo pudo haber experimentado avances significativos, lo que resultó en un mayor número de citas. Después de 2015, aunque el número de citas experimenta algunas fluctuaciones, la tendencia general sigue siendo positiva, alcanzando otro pico de 93 citas en 2022. Este patrón sugiere un creciente interés en el tema.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

Ahora, con el fin de identificar cuáles son los países con el mayor impacto, se propone un análisis de citas y documentos publicados por país. (Ver tabla 2).

**Tabla 2.**

*Cantidad de Citaciones y de Documentos Publicados por País.*

<b>País</b>	<b>Citaciones</b>	<b>Documentos</b>
<b>Países Bajos</b>	356	1
<b>Estados Unidos</b>	333	1
<b>Canadá</b>	114	2
<b>Corea del Sur</b>	81	2
<b>Eslovenia</b>	46	1
<b>Inglaterra</b>	45	1
<b>China</b>	62	6
<b>Taiwán</b>	9	3
<b>Alemania</b>	0	2

El análisis de las citas y la cantidad de documentos publicados por país revela que los Países Bajos y Estados Unidos, a pesar de tener solo un documento publicado cada uno, lideran en términos de citas, lo que indica un alto impacto de su investigación. Canadá y Corea del Sur, con dos documentos publicados cada uno, también han logrado un número considerable de citas, sugiriendo una buena recepción de su trabajo en la comunidad académica. Aunque China tiene el mayor número de documentos publicados, tiene relativamente pocas citas, lo que podría indicar que estos documentos son menos conocidos o citados en el campo. Taiwán y Alemania, a pesar de tener varios documentos publicados, tienen un bajo número de citas, lo que podría sugerir que estos documentos son relativamente nuevos, menos relevantes o conocidos entorno al tópico de interés.

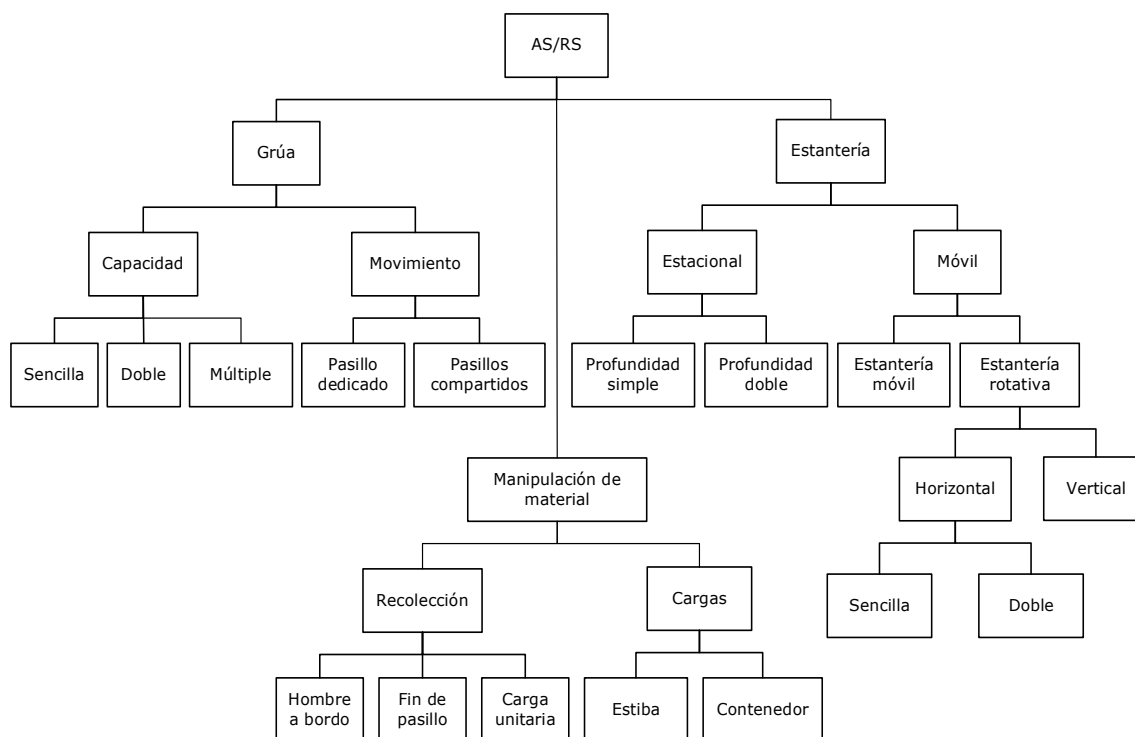
## 4.2. Revisión Preliminar de Literatura

### 4.2.1. Sistemas Automatizados de Almacenamiento y Recuperación

El manejo eficiente de materiales en el almacenamiento es un desafío considerable, especialmente con altos volúmenes de inventario y una demanda variable. Para modernizar el proceso de almacenamiento, se han desarrollado diversos métodos, incluyendo los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS). Estos sistemas mejoran significativamente la eficiencia del almacenamiento, reducen los costos operativos y aumentan los niveles de respuesta. La taxonomía de estos sistemas ha sido detallada por Roodbergen y Vis (2009) (ver figura 8).

#### Figura 8.

Clasificación de los AS/RSs.



Nota. Adaptado de Roodbergen & Vis (2009).

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

Roodbergen & Vis (2009) identifican los elementos principales de un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación AS/RS de manera específica: estanterías, grúas, pasillos, puntos E/S y posiciones de recolección. Además, Roodbergen & Vis (2009) definen las decisiones de diseño para los AS/RSs, (Ver tabla 3).

**Tabla 3.**

*Decisiones para el Diseño de los AS/RSs.*

<b>Clase de Problemas</b>	<b>Decisión que Tomar</b>
<b>Sistema Configuración</b>	Numero de pasillos
	Altura de las estanterías
	Largo de las estanterías
	Tamaño uniforme o ubicaciones de almacenamiento modular
	Número y locación de los puntos E/S
	Capacidad de almacenamiento de tránsito en los puntos E/S
	Numero de grúas por pasillo
<b>Asignación de Almacenamiento</b>	Numero de ordenes de recolección por pasillo
	Método de asignación de almacenamiento
<b>Lotificación</b>	Numero de clases de almacenamiento
	Tipo de lotificación (estático o dinámico)
	Tamaño del lote
<b>Secuenciación</b>	Selección de reglas de asignación de órdenes a lotes
	Restricciones de secuenciación (fechas de vencimiento)
	Tipo de ciclo (sencillo o doble)
	Programación (fija o dinámica)
<b>Punto de Reposo</b>	Método de secuenciación
	Tipo de posicionamiento (estático o dinámico)
	Ubicación en donde las grúas inactivas deberán posicionarse

*Nota.* Adaptado de Roodbergen & Vis (2009).

#### **4.2.2. Modelos Analíticos**

Los estudios actuales centran frecuentemente sus esfuerzos en los problemas de secuenciación y la asignación de almacenamiento, en donde se proponen soluciones con base en métodos analíticos. Luego, según menciona Gagliardi et. al (2014), la formulación de modelos analíticos implica establecer supuestos que simplifiquen la naturaleza compleja de los sistemas; no obstante, dicha simplificación puede implicar que en algunos casos la situación descrita no se ajuste adecuadamente a la realidad, por ejemplo, algunos modelos analíticos asumen la política de almacenamiento aleatorio y la configuración de un pasillo único, dicha decisión logra simplificar el estudio; sin embargo, este tipo de supuestos difícilmente tienen lugar en la realidad.

El modelo más ampliamente estudiado es el modelo de tiempo de viaje o tiempo de ciclo, propuesto inicialmente por Bozer & White (1984), quienes proponen un modelo estadístico que describe el tiempo de viaje para el caso en que se considere comando simple o dual, una configuración cuadrada en tiempo y la política de almacenamiento aleatorio. El estudio mencionado se establece como una base importante para investigaciones futuras.

#### **4.2.3. Modelos de Simulación**

Por otra parte, los modelos de simulación también pueden ser empleados, en especial en casos en que se requiera realizar alguna comparación entre distintas configuraciones de AS/RSs, el modelo resulta útil ya que permite considerar múltiples decisiones de diseño y control; sin embargo, también se hace necesario fijar parámetros iniciales lo que no siempre permite llegar a soluciones generales, según menciona Roodbergen & Vis (2009). Luego, Gagliardi et. al (2014), sostiene que la simulación es un método de análisis numérico diseñado para estimar las verdaderas características de sistemas complejos en donde sus componentes se comportan estocásticamente.

#### 4.2.4. *Medidas de Desempeño*

En los estudios llevados a cabo, la medida de desempeño comúnmente utilizada para evaluar el rendimiento es el tiempo de viaje, de acuerdo Xu X. et al (2015), esta medida de desempeño resulta crítica para evaluar el desempeño y nivel de servicio de los AS/RSs; es por esto por lo que la mayoría de los documentos recopilados aborda el estudio de esta medida de desempeño o relacionadas. En menor proporción, se estudia el consumo energético y distancia recorrida por la grúa. (Ver tabla 4).

**Tabla 4.**

*Medidas de Desempeño Estudiadas en Literatura.*

<b>Medida de Desempeño</b>	<b>Documento</b>
<b>Tiempo de Viaje</b>	Bozer & White. (1984),
	Hwang & Lee. (1990),
	Lerher et al. (2010).
	Wu et al. (2013).
	Xu et al. (2015).
	Xu et al. (2016).
	Xu et al. (2019).
	Tong & Hu (2019).
	Wang (2019).
	Lehmann & Knötgen (2020)
Lehmann & Hußmann (2021).	
Lin et al. (2021).	
<b>Costo de Diseño</b>	Hwang et al. (1999).
<b>Consumo Energético</b>	Hsu et al. (2022).

*Nota.* La tabla contiene las referencias de únicamente los documentos que abordan alguna medida de desempeño específica.

#### **4.2.5. AS/RS de Doble Profundidad**

Los estudios en torno a esta configuración son limitados, principalmente los estudios se centran en configuraciones menos complejas, como el AS/RS de profundidad sencilla; de acuerdo con Lerher et al. (2010), la mayoría de los investigadores se han concentrado en este.

De acuerdo con Lerher et al. (2010), al contrastar con las estanterías de profundidad sencilla, la configuración de doble profundidad presenta mejoras significativas en la optimización del espacio en los almacenes, debido a que, generalmente el área asignada a pasillos puede ser reducida a la mitad; no obstante, se advierte un incremento en el tiempo medio de viaje debido a las actividades de reubicación de viaje.

#### **4.2.6. Decisiones de Control**

El estudio de Lerher et al. (2010) propone un modelo para sistemas de almacenamiento y recuperación automatizados (AS/RS) de doble profundidad. Este modelo considera dos tipos de comandos: el comando simple y el comando doble. Una novedad de este estudio es que se define por primera vez el tiempo de reubicación. El modelo opera bajo ciertos supuestos, como la implementación de una política de almacenamiento aleatorio y una política de reubicación al espacio libre más cercano. Según las conclusiones del estudio, la inclusión del tiempo de reubicación resulta en un incremento en el tiempo de ciclo de aproximadamente el 2.82%. Además, se encontró que a medida que se incrementa el factor de ocupación, el tiempo de ciclo también aumenta. Finalmente, el estudio permite concluir que operar bajo comando doble es más eficiente que operar bajo comando simple, en las condiciones dadas.

En su estudio, Xu et al. (2016) construyen modelos de tiempo de viaje para los ciclos de comando simple y doble en un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación (AS/RS) de doble profundidad y múltiples pasillos, con el objetivo de que sirvan como herramienta para la

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

toma de decisiones de control. Además, analizan el equilibrio entre el costo del espacio de almacenamiento y el costo operativo de la máquina de almacenamiento y recuperación (S/R), encontrando un factor de grado de llenado óptimo que minimiza el costo total del sistema. Este estudio es pionero en la investigación de sistemas AS/RS de doble profundidad y múltiples pasillos con cintas transportadoras, demostrando que estos sistemas superan a los sistemas AS/RS de una sola profundidad y un solo pasillo en términos de costo total.

En lo que respecta a las políticas de almacenamiento, la mayoría de los estudios asumen una política de almacenamiento aleatorio. Sin embargo, también se presenta el caso de la política de almacenamiento basada en clases, que consiste en categorizar los productos de acuerdo con su nivel de rotación. Según Xu et al. (2019), los productos de mayor rotación deberían ubicarse cerca del punto de entrada/salida (E/S) sin embargo no se especifica el criterio de asignación. Adicionalmente, Xu et al. (2019) concluyen que la política de almacenamiento basada en clases genera un aumento en el desempeño en comparación con la política de almacenamiento aleatorio.

En su estudio Lehmann & Knötgen (2020), proponen un modelo de tiempo de viaje para determinar el punto óptimo de llenado de un almacén de doble profundidad. El modelo tiene en cuenta que un mayor nivel de llenado implica un mayor tiempo de viaje, por tanto, un mayor costo. Además, el modelo considera que los tiempos de ciclo de las secuencias de doble comando dependen de la distribución uniforme de las unidades de carga en la estantería. Los autores sugieren que una estrategia de almacenamiento que minimice la varianza de las cantidades de carga en los canales es más eficiente que una estrategia de almacenamiento aleatorio. Dicha política de almacenamiento es también estudiada por Lehmann & Hußmann (2021).

#### **4.2.7. *El Problema de la Reubicación***

En los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS) de doble profundidad, es necesario considerar el problema de la reubicación. Sin embargo, en la literatura, este tópico se aborda de forma limitada, siendo la solución más común la heurística de reubicación a la posición libre más cercana. Esta definición puede resultar ambigua, ya que no especifica claramente el criterio de asignación. Aunque no se encuentra información relacionada con políticas alternativas para reducir el impacto de la reubicación en el tiempo de viaje, existen amplios análisis sobre la probabilidad de ocurrencia de la reubicación, la cual está directamente relacionada con el factor de ocupación. Lerher et al. (2010) establecen dos estrategias de almacenamiento para dos rangos del factor de ocupación. La primera, cuando la ocupación es menor al 50%, elimina la posibilidad de realizar maniobras de reubicación durante las tareas de almacenamiento y recuperación. En el caso de que el factor de ocupación supere el 50%, Lerher et al. (2010) enuncian la definición de la probabilidad de reubicación.

En la literatura se describe una estrategia que tiene como objetivo minimizar la cantidad de reubicaciones, que consiste en distribuir uniformemente el llenado de los canales, esto mientras el factor de llenado de la estantería sea menor a 0.5, según lo menciona Xu et. al, (2016); sin embargo, para casos en que el factor de llenado sea superior a 0.5, no se encuentra ninguna solución distinta que la heurística del vecino más cercano. Es importante destacar que dicha solución se aborda desde las decisiones de almacenamiento.

A continuación, se presenta una tabla que sintetiza y complementa la revisión bibliográfica, allí se podrán observar consideraciones adicionales, como el tipo de ciclo y la política de reubicación. (Ver tabla 5).

**Tabla 5.***Decisiones para el Control de los AS/RSs.*

<b>Autor</b>	<b>Política de Almacenamiento</b>	<b>Política de Recuperación</b>	<b>Política de Reubicación</b>	<b>Tipo de Ciclo</b>
<b>Lerher et al. (2010)</b>	Aleatoria	Aleatoria	Al vecino más cercano	Simple y doble
<b>Xu et al. (2016)</b>	Aleatoria	Aleatoria	Al vecino más cercano, determinística y aleatoria	Simple y doble
<b>Xu et al. (2019)</b>	Aleatoria y basado en clases	FCFS	Al vecino más cercano	Simple y doble
<b>Lehmann &amp; Knötgen (2020)</b>	Minimización de varianza y aleatoria	No especifica	Al vecino más cercano y aleatoria	Simple y doble
<b>Hsu et al. (2022)</b>	Almacenamiento determinístico	FCFS, Aleatoria, GA, PSO y WOA	No especifica	Doble

#### 4.2.8. *Discusión de la Revisión*

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

- Estantería de Doble Profundidad:** La configuración de doble profundidad en los sistemas de almacenamiento ofrece un uso más eficiente del espacio en comparación con las estanterías de profundidad sencilla. No obstante, esta ventaja viene con un aumento en el tiempo de viaje, principalmente debido a las tareas adicionales de reubicación necesarias para acceder a las unidades de carga situadas en la parte trasera. Este incremento en la complejidad operacional hace que el análisis de tales sistemas sea más complicado. Aunque la investigación sobre sistemas de doble profundidad es limitada, las soluciones existentes suelen emplear la heurística del vecino más cercano para reubicaciones.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

- **Almacenamiento Basado en Clases:** en literatura se establece que esta estrategia de almacenamiento resulta más eficiente en términos de tiempo de operación, en comparación con almacenamiento no clasificado.
- **Tiempo de Viaje:** la mayoría de los estudios revisados, establecen el tiempo de viaje como una métrica importante para evaluar el desempeño de estos sistemas. Para este estudio se considera el tiempo total de ejecución de una secuencia de operaciones.
- **Decisiones de Control:** para el caso de las políticas de almacenamiento y reubicación sus descripciones pueden resultar ambiguas. Por ejemplo, en el almacenamiento basado en clases, se considera que los productos de mayor rotación deben colocarse en las posiciones más cercanas al punto de entrada/salida. Sin embargo, si también se tiene en cuenta la velocidad de desplazamiento de la grúa, las posiciones que están físicamente más cerca no siempre son las más rápidas en términos de tiempo de acceso. Esto se debe a que la grúa puede tardar más tiempo en llegar a una posición, que, aunque esté físicamente cerca, implica un recorrido más lento. En cuanto a las políticas de reubicación, también se observa esta ambigüedad. Aunque existe la heurística de reubicar al más cercano, no se especifican claramente los criterios adicionales que se deben considerar, como los factores de desempate para decidir entre varias posiciones factibles cercanas. Esto podría generar confusión sobre cuál es realmente la mejor ubicación de reubicación en situaciones concretas. Por otra parte, las descripciones de las políticas de recuperación se consideran claras.

## 5. Formulación del Método Heurístico

Como se evidenció en la revisión bibliográfica, el problema de la reubicación ha sido abordado desde el punto de vista del paradigma de los métodos heurísticos, siendo el ejemplo más identificable la estrategia de reubicar a la posición libre más cercana. También se menciona la política de reubicación de forma aleatoria y la reubicación de forma predeterminada. Las heurísticas mencionadas en la literatura se muestran como una solución conveniente que facilita el análisis matemático. Por otra parte, dichas políticas se presentan mediante proposiciones textuales que pueden dar lugar a múltiples interpretaciones. Un ejemplo de lo mencionado es el caso del concepto de cercanía, ya que este puede asociarse a la distancia física o temporal. Por lo anterior, se propone un modelo conceptual que ayude a precisar la naturaleza de la heurística.

### 5.1. Modelo Conceptual de Matrices de Priorización y Restricciones

El modelo conceptual que se propone, de forma intuitiva puede asociarse a concepto de la escala de Likert; sin embargo, su diferencia principal es que su representación no es un vector sino una matriz que obedece a las dimensiones de la estantería, por lo que cada posición en la estantería correspondería a un grado en la escala matricial. Ahora bien, dicha escala puede ser manipulada de acuerdo con algún criterio que se defina, por ejemplo, se tiene una estantería de profundidad sencilla, y se establece que la matriz deberá ser llenada de acuerdo con la distancia Chevyshev tomando como referencia la celda inferior izquierda, en este caso la escala matricial será llenada con el valor de las distancias de separación entre el punto de referencia para cada una de las celdas.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

**5.1.1. Matrices de Priorización**

La representación no escalada de una matriz de priorización mantiene las unidades originales del problema. Sin embargo, para simplificar el proceso, se omiten las unidades y se enumeran por conveniencia las celdas de menor a mayor. Esto facilita la toma de decisiones sobre el almacenamiento al evitar unidades complicadas y cadenas de dígitos decimales, manteniendo el orden relativo en la escala y logrando una representación más uniforme. Luego, por ejemplo, si el criterio es almacenar un producto en la posición más cercana al punto de referencia, se consulta la matriz de priorización en busca de la celda con la puntuación más baja en este caso, indicando la mayor cercanía. Una vez encontrada la posición, se procede con la tarea de almacenamiento, (ver figura 9).

**Figura 9.**

*Matriz de Priorización de Cercanía a un Punto de Referencia.*

3	3	3	3
2	2	2	3
1	1	2	3
Punto de referencia	1	2	3

Ahora bien, como se observa en el ejemplo representado en la figura 9, hay tres alternativas de almacenamiento iguales en grado, entonces el almacenamiento se realiza según algún criterio de desempate que se establezca, para el caso de esta investigación el criterio consiste en seleccionar de forma aleatoria una de las tres posiciones.

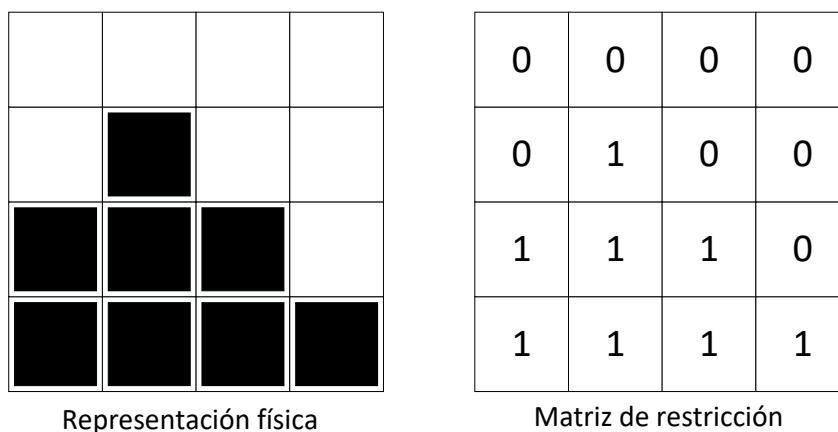
## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

**5.1.2. Matrices de Restricción**

Las matrices de restricción almacenan información de forma binaria, un ejemplo práctico es una matriz de ocupación, en donde si la celda está ocupada se asigna el valor de 1, en caso contrario se asigna 0, (ver figura 10).

**Figura 10.**

*Estantería Parcialmente Llena y su Matriz de Restricción.*



Luego es necesario incluir en el modelo conceptual una forma de controlar la decisión de almacenamiento por clases, para ello se parte de una matriz categórica en donde se especifica la etiqueta de clase y posteriormente se extrae la matriz de restricción para la clase que se seleccione, por ejemplo, si se tienen tres clases A, B, y C, se conoce la zonificación en la estantería y se quiere obtener la matriz de restricción para la clase B, entonces las celdas asignadas a la clase B en la estantería se codifican con el valor de 1. (ver figura 11).

**Figura 11.***Estantería Zonificada y la Matriz de Restricción para la Clase B*

A	B	B	C	0	1	1	0
A	B	B	C	0	1	1	0
A	B	B	C	0	1	1	0
A	B	B	C	0	1	1	0

Representación física
 Matriz de restricción

**5.1.3. Operación de Matrices**

- Multiplicación:** Solo se considera la multiplicación entre matrices de priorización y matrices de restricción. La operación es una multiplicación de Hadamard en donde cada elemento en una matriz se multiplica por el elemento correspondiente en la otra matriz, en donde la restricción de que las matrices sean de iguales de dimensiones se cumple en todos los casos, dado que las matrices son una representación de la estantería y las dimensiones son únicas. Esta operación se realiza con el fin de limitar el campo de alternativas. Por ejemplo, si se tiene una matriz de zonificación (Figura 9) y se multiplica con la matriz de restricción para la clase B (Figura 11), se obtiene una nueva matriz de priorización. En esta nueva matriz, aunque se conserva el criterio de cercanía al punto de referencia, las alternativas se limitan únicamente a la zona B. Sin embargo, es importante notar que algunas celdas toman el valor de 0 como resultado de la multiplicación; estas celdas no deben ser consideradas como alternativas factibles.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

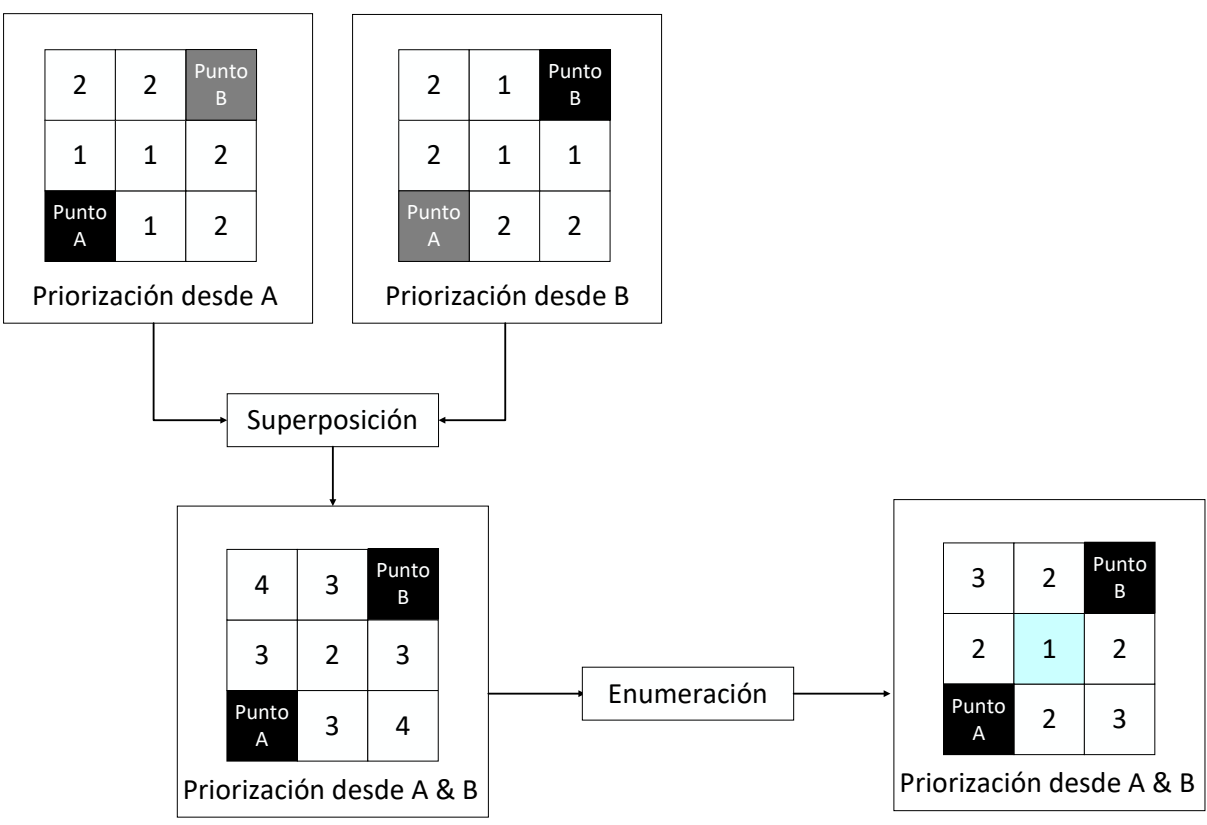
- **Enumeración de Prioridades:** Parte de esta operación ya fue descrita anteriormente; sin embargo, aquí se amplía la explicación sobre cómo se realiza la enumeración. En el ejemplo mencionado en el numeral 5.1.1 sobre matrices de priorización, la enumeración se efectuó siguiendo el orden de los valores originales, asignando el grado 1 a la posición más cercana y el último grado posible a la posición más lejana, es decir, el menor grado a la menor distancia. Ahora, consideremos un caso contrario, donde se realiza la trazabilidad de la entrada de ítems a una estantería, asignando una etiqueta con el orden de entrada de cada ítem al sistema. Si se desea recuperar el último ítem que ha ingresado, se pueden consultar las etiquetas de entrada y seleccionar el ítem con la etiqueta de mayor valor, siendo este el grado 1 en la búsqueda. Es importante notar que la mejor alternativa siempre tendrá el grado 1 en la escala matricial, lo cual facilita la selección de la mejor posición a nivel algorítmico, ya que después de realizar la enumeración, siempre se buscará el elemento con grado 1. En contraste, si se establece un orden inverso, la mejor alternativa sería la que tiene el mayor grado. Sin embargo, no se puede tener certeza del valor exacto de dicho grado, solo que será menor que la cantidad de posiciones en la estantería y mayor que todos los demás grados.
- **Superposición:** Adicionalmente se considera la superposición de matrices de priorización, dicha operación se propone por la necesidad de poder representar matrices con disposiciones más específicas de los grados o varios criterios de forma simultánea. Por ejemplo, si se requiere considerar la cercanía física de las celdas a dos puntos de referencia de forma simultánea, se puede empezar construyendo las

POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

matrices de priorización separadas por cada punto de referencia y convenientemente luego superponerlas con el fin de obtener una matriz de priorización que considere este criterio un poco más complejo. (Ver figura 12).

**Figura 12.**

*Superposición y Enumeración de Matrices de Priorización Diferentes.*



Como se observa en la figura 12, la matriz final arroja que el punto que se encuentra a la menor distancia entre los dos puntos de referencia es algún punto medio de forma colineal, esto puede ser demostrado de forma matemática.

**5.1.4. Supuestos del Modelo Conceptual**

- **S1:** el modelo se aplica tanto a estanterías de profundidad simple como a estanterías de doble profundidad, incluso se pueden considerar profundidades múltiples.
- **S2:** en el caso de estanterías de doble profundidad, las posiciones de almacenamiento se dividen en dos planos: uno frontal y otro trasero, lo que implica que se necesita un criterio adicional para priorizar al segundo plano. Un ejemplo del criterio puede ser el definido por Lehmann & Hußmann (2021), que establece llenar primero las posiciones más profundas.
- **S3:** las matrices de priorización utilizan una escala de valores que refleja la preferencia para la colocación de unidades de carga. Esta escala puede basarse en diferentes criterios como la cercanía a un punto de referencia o la priorización asociada a una medida de desempeño como tiempo de operación, para el caso del presente estudio.
- **S4:** cada celda en la matriz representa una posición en la estantería y está valorada según su conveniencia para el almacenamiento, recuperación o la reubicación.
- **S5:** las matrices de restricción son binarias, indicando si una posición es factible como alternativa de almacenamiento, recuperación o reubicación. También pueden reflejar la zonificación de la estantería según la política de almacenamiento basada en clases, donde se especifica qué posiciones son factibles para cada clase de productos.
- **S6:** la multiplicación entre matrices de priorización y matrices de restricción se realiza para limitar el campo de alternativas de almacenamiento, recuperación o

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

reubicación. Esto se lleva a cabo mediante la multiplicación de Hadamard, que combina los valores de ambas matrices.

- **S7:** las celdas en las matrices de priorización se enumeran de menor a mayor según el criterio de preferencia. Por ejemplo, las celdas más cercanas a un punto de referencia recibirán los valores más bajos indicando prioridad máxima.
- **S8:** en caso de empate en los valores de priorización, se utiliza un criterio de desempate, como la selección aleatoria entre las celdas con la misma prioridad.
- **S9:** se permite la superposición de múltiples matrices de priorización para representar criterios más complejos, como la consideración de múltiples puntos de referencia u otras medidas de desempeño que se adapten a la lógica.

### **5.2. Política de Reubicación Alternativa**

Con base en el modelo conceptual planteado, se establece una política de reubicación alternativa considerando factores no estudiados en la literatura. Para construir dicha política, se extiende la política de minimización de varianza utilizada para realizar almacenamientos, definida por Lehmann & Hußmann (2021), al contexto de la reubicación. Además, se considera la lista de recuperación y el sistema de almacenamiento basado en clases, esto con el fin de cumplir el objetivo general. Por otra parte, se realiza una reconstrucción de la lógica de las políticas de reubicación mencionadas en literatura, estableciendo de forma clara los criterios de reubicación mediante el uso del modelo conceptual propuesto.

Ahora bien, la heurística de minimización de varianza se establece como base para formular la política de reubicación alternativa, y para reconstruir las demás políticas de reubicación mencionadas en literatura. Además, bajo el modelo conceptual propuesto, la política de

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

almacenamiento por clases se considera aplicando la multiplicación de cualquier matriz de priorización que se describen a continuación y la matriz de restricción de clase.

### **5.2.1. Reubicación con Minimización de Varianza**

Esta política fue definida explícitamente por Lehmann & Hußmann (2021), como estrategia de ubicación de cargas, en donde se procura ubicar los ítems en primer lugar, en la capa más profunda de la estantería, esto con el fin de mantener una disposición uniforme de los ítems en estantería y evitar apilamientos innecesarios, lo que implica menos reubicaciones.

Este criterio puede ser condensado en una matriz de priorización, en donde se asigna la mayor prioridad a las ubicaciones libres más profundas.

### **5.2.2. Reubicación no Obstructiva con Minimización de Varianza**

El criterio que se define a continuación no ha sido estudiado en la literatura, siendo este la estrategia de reubicación alternativa propuesta.

El criterio de esta reubicación se basa en no obstruir un ítem próximo a salir, en la medida de lo posible y considerando minimizar la varianza. Para ello, es necesario consultar cuáles son los ítems próximos por salir según la lista de recuperación y realizar la reubicación en consecuencia. Al emplear la política de recuperación FCFS (*First Come, First Served*), la lista de recuperación se conoce de antemano, lo que permite llevar un seguimiento de los ítems próximos a salir asignando una etiqueta del orden de entrada a cada elemento. Cuando se presenta la necesidad de reubicación, se consultan los ítems con la etiqueta de menor valor, que indica una entrada temprana. Teniendo esto en cuenta, la reubicación se realiza procurando no obstaculizar dichos ítems y minimizando la varianza. De este modo, la reubicación se guía, en primer lugar,

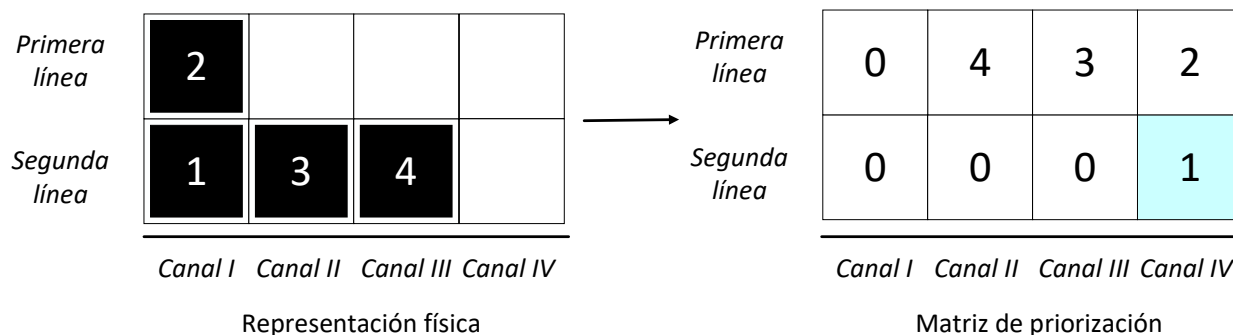
## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

hacia los canales vacíos en las posiciones más profundas. Si es imposible no obstaculizar algún ítem, se apila el ítem a reubicar sobre el ítem que recién haya ingresado.

Para construir la matriz de priorización, únicamente se consideran las posiciones libres de la estantería. La enumeración comienza en los canales libres, ya que reubicar allí no implica obstrucción de algún ítem, y se inicia en las posiciones más profundas. Luego, se enumeran las posiciones de acceso empezando con el ítem que tenga la entrada más reciente. En la figura 13, se puede visualizar una representación transversal superior de una estantería y la matriz de priorización asociada según los criterios descritos. Las celdas ocupadas se excluyen asignándoles un valor de cero. La numeración comienza en el canal IV, que está vacío, siendo la posición más profunda la que toma el grado 1. La enumeración continúa con la otra celda libre del mismo canal. Luego, se identifican dos posiciones libres, una en el canal II y otra en el canal III. Sin embargo, el criterio favorece asignar el siguiente mejor grado a la posición de acceso del ítem que está último en la lista de recuperación. En este caso, se enumera primero la posición libre del canal III ya que el potencial elemento a obstaculizar fue el último en entrar.

**Figura 13.**

*Estantería y su Matriz de Restricción para Reubicación no Obstructiva.*



## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

### **5.2.3. *Reubicación Aleatoria con Minimización de Varianza***

El autor Xu et al. (2016), menciona el uso de la política reubicación aleatoria, sin embargo, no brinda muchos detalles de la lógica implementada, por otra parte, Lehmann & Hußmann (2021), describe claramente una política de reubicación aleatoria con minimización de varianza, si bien la decisión de en donde reubicar se realiza de forma aleatoria, el sorteo se ve limitado en primer lugar a la capa de mayor profundidad hasta que esta sea llenada, y luego a la capa superficial.

### **5.2.4. *Reubicación Cerca al Punto de Entrada y Salida***

Esta política de reubicación tiene como objetivo mover el ítem a la posición libre más cercana en tiempo al punto de recuperación. Se asume que, si la reubicación es inevitable, es ventajoso acercar el ítem al punto de recuperación en lugar de alejarlo. Esto facilita que, cuando se solicite la recuperación, el ítem ya esté en una posición cercana, reduciendo así el tiempo de operación.

Además, este criterio se integra con el de minimización de varianza para evitar reubicar el ítem en una posición superficial sin haber almacenado previamente un ítem en una posición más profunda. Por lo tanto, la matriz de priorización se construye asignando el menor grado a las posiciones libres más cercanas y profundas.

### **5.2.5. *Reubicación a la Posición Libre más Cercana***

Como se evidenció en la revisión de literatura, esta política es común, sin embargo, su definición no es clara, o su interpretación varía de un autor a otro, entonces se propone una reconstrucción de la política “al vecino más cercano”, considerado cercanía en tiempo, y minimización de varianza, conservando el punto de referencia definido como la posición inicial

del elemento a reubicar. Entonces el criterio consiste en realizar la reubicación a la posición más cercana en tiempo desde la posición actual del elemento a reubicar.

## 6. Formulación de un Modelo de Simulación

Como fue mencionado en la revisión de literatura los modelos de simulación son considerados herramientas útiles cuando se requiere realizar alguna comparación entre distintas configuraciones de AS/RS. Luego en el presente estudio se pretende comparar las políticas de reubicación, por lo cual resulta adecuado formular un modelo de simulación.

Ahora bien, el modelo de simulación se construye con base en el esquema planteado por Gagliardi et al. (2014). En el apéndice A, se puede consultar los diagramas de flujo que describen como se procesan las solicitudes de almacenamiento y recuperación. Luego en el apéndice B, se consigna la lógica de programación en lenguaje Python.

### 6.1. Parámetros de Entrada

Con base en lo obtenido en la literatura se definen los parámetros relevantes de entrada con el fin de estudiar el problema de reubicación.

- **Diseño Físico del Sistema:** se considera un AS/RS compuesto, una estantería, la cual dispondrá de niveles, bahías y profundidades. La profundidad de la estantería es doble.
- **Dimensiones de la Celda de Estantería:** únicamente se define el alto(h), ancho(w) y profundidad(d) de la celda de estantería, las dimensiones son iguales para todas las celdas de la estantería. Luego sus valores se definen de acuerdo con Lerher et al. (2010)

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

- **Cinemática de la Grúa:** la grúa tendrá tres tipos de movimientos; a) a lo largo de riel, esto para realizar desplazamientos entre la estantería y el punto de entrada y salida, b) desplazamiento en estantería; en este caso la grúa sigue una trayectoria Chebyshev de forma paralela al plano frontal de la estantería, no se considera aceleración en el movimiento de la grúa. Los valores se establecen de acuerdo con Lerher et al. (2010).
- **Cantidad de Clases:** se establecen tres clases de acuerdo con la estrategia de almacenamiento basado en clases ABC, además se establece que cada clase corresponde a un SKU.
- **Capacidad Asignada por Clase:** la capacidad se distribuirá así, para la primera clase un 20%, para la segunda 40% y para la tercera 40%, se define según el principio de Pareto, asignado el 20% de las ubicaciones a la primera clase, y distribuyendo en el 80% restante entre la clase B y C, esta última división se opta por que sea igual.
- **Factor de Asimetría por Clases:** Se establece que la cantidad de solicitudes de almacenamiento o recuperación será igual para cada clase. Es decir que la proporción de actividades de almacenamiento de almacenamiento y recuperación es 1:1, y que para cada clase la proporción de almacenamientos o recuperaciones es de 1:1:1, para clase A, B, y C respectivamente.
- **Tipo de ciclo:** las operaciones serán de comando simple, se ejecutará una tarea de almacenamiento o de recuperación a la vez, como en Xu et al. (2016).
- **Políticas de Almacenamiento:** se considera almacenamiento con minimización de varianza, como en Lehmann & Knötgen (2020).

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

- **Políticas de Recuperación:** se establece que se seguirá la política FCFS para realizar la reubicación, como en Xu et al. (2019).
- **Estrategia de Reubicación:** se consideran las estrategias de reubicación listadas en el inciso 5.2 del presente documento.
- **Nivel de Ocupación:** Xu et al. (2016), establece que un nivel de ocupación óptimo debe ser mayor a 0.8, entonces se establece 0.85 como parámetro para este estudio.

En la tabla 6 se reúnen los parámetros para la simulación.

**Tabla 6.**

*Parámetros para la Simulación.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Referencia</b>
<b>Cantidad de Filas</b>	18	
<b>Cantidad de Columnas</b>	20	
<b>Cantidad Celdas por Canal</b>	2	
<b>Alto de Fila</b>	1.6 [m]	
<b>Ancho de Columna</b>	0.9 [m]	Lerher et al. (2010)
<b>Profundidad de Canal</b>	1.1 [m]	
<b>Velocidad en Filas</b>	1 [m/s]	
<b>Velocidad en Columnas</b>	1.5 [m/s]	
<b>Velocidad por Canal</b>	0.7 [m/s]	
<b>Tipo de Comando</b>	Simple	Xu et al. (2016)
<b>Factor de Ocupación</b>	0.85	
<b>Capacidad por Clase</b>	[A:20, B:40, C:40]	Propuesto
<b>Política de Almacenamiento</b>	Minimización de varianza	Lehmann & Knötgen (2020)
<b>Política de Recuperación</b>	FCFS	Xu et al. (2019)

## 6.2. Supuestos del Modelo de Simulación

El modelo de simulación opera con los siguientes supuestos.

- **S1:** la secuencia de operaciones se genera antes de correr la simulación.
- **S2:** el orden de ejecución de las actividades de almacenamiento y recuperación se realizará según lo defina la secuencia de operaciones.
- **S3:** las actividades de la secuencia se ejecutan de manera continua, es decir, una vez que se completa una actividad, la siguiente actividad en la secuencia comienza inmediatamente sin ningún retraso.
- **S4:** la naturaleza aleatoria de la secuencia puede llevar a situaciones particulares. Por ejemplo, puede haber momentos en los que la frecuencia de las operaciones de almacenamiento sea mayor que la de las operaciones de recuperación. Si esto ocurre y la estantería se llena, entonces se omite la operación de almacenamiento debido a la falta de espacio disponible. De manera similar, si en algún momento la frecuencia de las operaciones de recuperación es mayor y las existencias se agotan, entonces se omite la operación de recuperación, ya que no hay existencias del ítem solicitado.
- **S5:** cuando se solicita la recuperación de un ítem que está obstruido y no hay espacio disponible para reubicar el ítem que lo obstruye, se implementa una estrategia de reubicación predeterminada. Esta estrategia consiste en mover temporalmente el ítem obstructor a una ubicación fuera de la estantería. Una vez liberado el espacio, se procede a recuperar el ítem solicitado. Finalmente, el ítem que se había movido de manera provisional se retorna a la estantería.

### 6.3. Verificación de la Herramienta de Simulación

La herramienta de simulación fue verificada mediante pruebas manuales, se ingresaron parámetros adaptados que facilitaron la interpretación, como unas dimensiones de estantería más reducidas, velocidad de grúa homogénea en sus componentes, y un largo de secuencia más reducido. Además, se utilizó el aplicativo Git para llevar un control de versiones del código, en donde por cada implementación y verificación importante se realizó una actualización del código. Este proceso de control de versiones permitió un seguimiento detallado de los cambios realizados, facilitando la identificación y corrección de errores. Cada actualización fue documentada con mensajes descriptivos que indicaban las modificaciones realizadas y su propósito, lo que mejoró la comprensión del código.

También se realizó una prueba básica de rendimiento, dicha prueba fue ejecutada en un equipo de cómputo con las especificaciones contenidas en la tabla 7, esto permitió identificar problemas de rendimiento en el código, por lo cual se realizaron tareas de optimización, logrando reducir el tiempo de ejecución de la simulación 8 veces en comparación con una versión inicial estable. Dicha mejoría se debe en gran medida por la utilización de la librería *multiprocessing* en Python, que permite utilizar todos los núcleos del procesador. El tiempo de ejecución de la rutina con las mejoras fue de 4 horas.

**Tabla 7.**

*Características de la Herramienta de Computo.*

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>
<b>Versión de Python</b>	3.12.3
<b>Configuración del equipo</b>	8 GB de RAM
	Procesador Intel(R) Core (TM) i5-11300H @ 3.10GHz (8 CPUs)
	Sistema Operativo de 64 bits

## 7. Experimentación a través del Modelo

### 7.1. Objetivo de la Experimentación

El objetivo principal de esta fase es evaluar y comparar la eficiencia de diferentes políticas de reubicación en un Sistema Automatizado de Almacenamiento y Recuperación (AS/RS) de doble profundidad. Se utilizará el tiempo de operación como la medida clave de desempeño, que incluye las actividades de almacenamiento, recuperación y reubicación.

### 7.2. Descripción del Experimento

Se ha desarrollado una herramienta de simulación para modelar el AS/RS de doble profundidad. La simulación se lleva a cabo para analizar cómo cada política de reubicación afecta el rendimiento del sistema en términos de tiempo total de operación.

#### 7.2.1. Definición de Métricas

- **Tiempo Total de Almacenamiento (TTA):** Suma del tiempo dedicado a todas las operaciones de almacenamiento desde el inicio hasta el final de la simulación.
- **Tiempo Total de Recuperación (TTRc):** Suma del tiempo necesario para completar todas las operaciones de recuperación.
- **Tiempo Total de Reubicación (TTRb):** Suma de los tiempos empleados en todas las operaciones de reubicación.
- **Tiempo Total de Operación (TTO):** Es la suma del tiempo acumulado de almacenamiento, recuperación y reubicación. Se considera que esta métrica compuesta proporciona información integral del rendimiento del sistema bajo cada política de reubicación.

Para facilitar el etiquetado de los datos, se reduce el nombre de las métricas mediante siglas.

### 7.2.2. *Proceso de Simulación*

- **Configuración del Modelo:** Se utiliza el modelo de simulación planteado, configurado con los parámetros previamente definidos.
- **Ejecución de Simulaciones:** Para cada política de reubicación, se realizan 1000 réplicas, favoreciendo resultados confiables. Se define que la secuencia a simular sea suficientemente larga para reducir el impacto de estados iniciales, estableciéndola como un factor de 10 de la cantidad total de ubicaciones.
- **Recolección de Datos:** Durante la simulación, se registran y acumulan los tiempos de operación para cada tipo de actividad (almacenamiento, recuperación y reubicación). Estos datos se recopilan al final de cada réplica.

### 7.2.3. *Escenarios de Simulación*

Los escenarios para evaluar están dados por las políticas de reubicación a considerar.

- **Reubicación no Obstructiva con Minimización de Varianza (K)** Evita bloquear unidades que estarán próximas a ser recuperadas.
- **Reubicación Aleatoria con Minimización de Varianza (P):** Combina la selección aleatoria con la minimización de la varianza.
- **Reubicación Cerca al Punto de Entrada y Salida (Q):** Reubica las unidades lo más cerca posible del punto de entrada/salida para minimizar el tiempo de recuperación.
- **Reubicación a la Posición Libre Más Cercana (G):** Mueve las unidades a la posición libre más cercana a su ubicación actual.

Para facilitar el etiquetado de los datos, se codifican las políticas mediante letras mayúsculas.

## 8. Análisis de Resultados

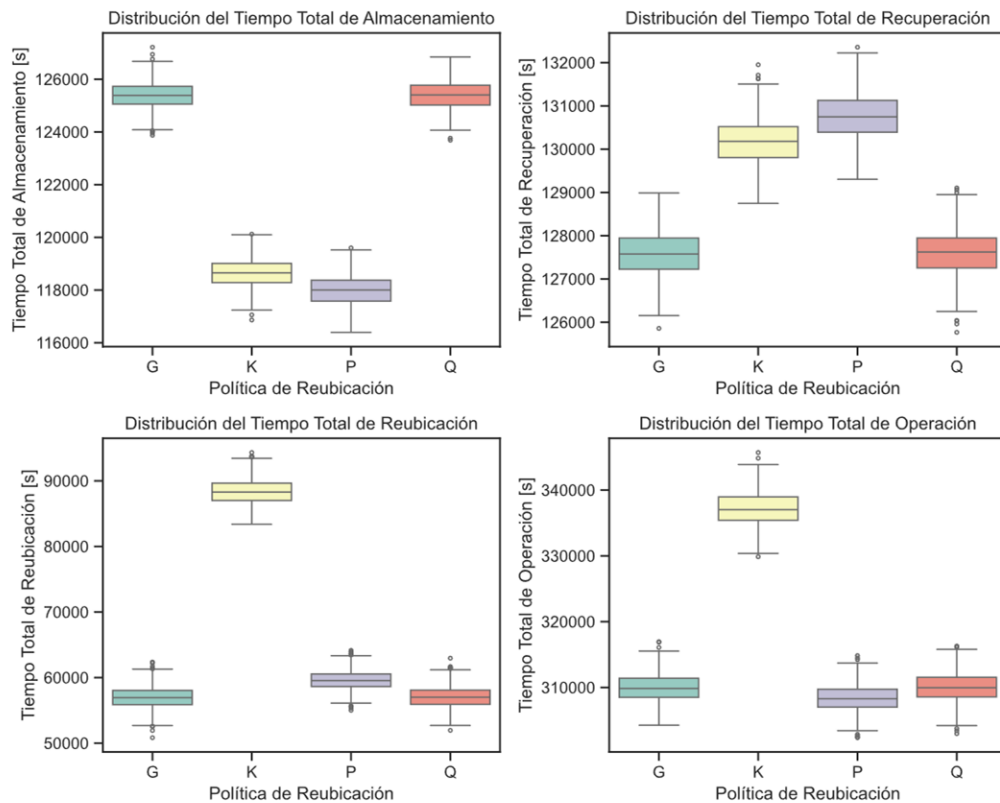
El procesamiento de los resultados de simulación (apéndice C) se realizó en entorno Python, haciendo uso de librerías estadísticas. El detalle del procesamiento puede ser consultado en el apéndice D.

### 8.1. Análisis Descriptivo de las Políticas de Reubicación

Por cada política de reubicación y métrica se calcula medidas de tendencia central. Luego se representan los datos mediante diagramas de caja, con el fin de describir la distribución de los datos e identificar valores atípicos (ver figura 14).

**Figura 14.**

*Distribución de las Métricas para cada Política de Reubicación.*



## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

**Tabla 8.***Resumen de Métricas Descriptivas.*

Política	Métrica	Media	Mediana	Desviación Estándar	Rango Intercuartílico (IQR)
<b>G</b>	TTA	125.402	125.388	523	674
	TTRc	127.587	127.577	502	720
	TTRb	56.982	56.937	1.658	2.174
	TTO	309.972	309.855	2.133	2.901
<b>K</b>	TTA	118.663	118.653	539	727
	TTRc	130.178	130.182	520	715
	TTRb	88.344	88.292	1.918	2.643
	TTO	337.186	337.026	2.530	3.556
<b>P</b>	TTA	117.987	118.003	552	793
	TTRc	130.758	130.748	521	735
	TTRb	59.614	59.544	1.438	1.915
	TTO	308.359	308.291	1.973	2.720
<b>Q</b>	TTA	125.405	125.405	530	751
	TTRc	127.601	127.624	524	692
	TTRb	56.991	57.006	1.610	2.178
	TTO	309.997	309.962	2.180	2.984

*Nota.* Los valores han sido redondeados para facilitar la interpretación. Los valores están en segundos y se usa ‘.’ como separador de miles.

- **Política G:**

La política G se caracteriza por sus altos tiempos de almacenamiento. La media es de 125.402, y la mediana es de 125.388. La desviación estándar es de 523 y el rango intercuartílico (IQR) es de 674, lo que indica una dispersión moderada. En los gráficos de caja, se ve una caja de tamaño

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

moderado y algunos puntos fuera de las "barbas", sugiriendo variaciones extremas en los tiempos de almacenamiento.

Para los tiempos de recuperación (TTRc), G muestra una eficiencia notable con una media de 127.587 y una mediana de 127.577 destacando la simetría en la distribución. La desviación estándar es de 502 y el IQR es de 720, lo que sugiere una baja variabilidad. Los gráficos de caja muestran una caja estrecha, indicando consistencia en la recuperación y pocos valores atípicos.

En términos de reubicación (TTRb), G tiene una media de 56.982 y una mediana de 56.937. Con una desviación estándar de 1.658 y un IQR de 2.174, los tiempos de reubicación están bien controlados. Los gráficos de caja reflejan esto con una caja pequeña, indicando poca dispersión y consistencia en los tiempos de reubicación.

Para el tiempo total de operación (TTO), G presenta una media de 309.972 y una mediana de 309.855. La desviación estándar es de 2.133 y el IQR es de 2.901, indicando un rendimiento general eficiente y consistente, a pesar de los altos tiempos de almacenamiento. En los gráficos de caja, se ve una caja de tamaño moderado, reflejando la eficiencia global de esta política con pocos valores atípicos.

- **Política K:**

La política K se destaca por tener los tiempos de almacenamiento más bajos, con una media de 118.663 y una mediana de 118.653. La desviación estándar es de 539 y el IQR es de 727, reflejando una dispersión moderada. Los gráficos de caja muestran una caja relativamente pequeña para TTA, lo que indica consistencia y eficiencia en el almacenamiento.

En los tiempos de recuperación (TTRc), K muestra tiempos elevados, con una media de 130.178 y una mediana de 130.182. La desviación estándar es de 520 y el IQR es de 715,

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

sugiriendo una mayor variabilidad. Los gráficos de caja para TTRc presentarían una caja más alta, indicando mayor dispersión y algunos valores atípicos en los tiempos de recuperación.

Para TTRb, K tiene la mayor variabilidad con una media de 88.344 y una mediana de 88.292. La desviación estándar es de 1.918 y el IQR es de 2.643, reflejando una alta dispersión en los tiempos de reubicación. Los gráficos de caja para TTRb muestran una caja grande, indicando alta variabilidad y muchos valores atípicos, sugiriendo ineficiencia en la reubicación.

En cuanto al TTO, K tiene la media más alta con 337.186 y una mediana de 337.026. La desviación estándar es de 2.530 y el IQR es de 3.556, reflejando una amplia dispersión. En los gráficos de caja, se ve una caja grande para TTO, indicando que esta política es menos eficiente en términos generales, con muchos valores atípicos que representan tiempos totales de operación largos.

La política P es eficiente en almacenamiento, con una media de 117.987 y una mediana de 118.003. La desviación estándar es de 552 y el IQR es de 793, indicando una dispersión moderada. Los gráficos de caja para TTA muestran una caja pequeña, reflejando una buena consistencia en el almacenamiento.

Para TTRc, P presenta tiempos altos de recuperación con una media de 130.758 y una mediana de 130.748. La desviación estándar es de 521 y el IQR es de 735, indicando una mayor variabilidad. Los gráficos de caja para TTRc muestran una caja más alta, reflejando mayor dispersión y algunos valores atípicos.

En términos de reubicación (TTRb), P es efectiva con una media de 59.614 y una mediana de 59.544. La desviación estándar es de 1.438 y el IQR es de 1.915, sugiriendo que los tiempos de reubicación están bien controlados. Los gráficos de caja para TTRb reflejan esto con una caja pequeña, indicando poca dispersión y consistencia en los tiempos de reubicación.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

Finalmente, para TTO, P tiene una media de 308.359 y una mediana de 308.291. La desviación estándar es de 1.973 y el IQR es de 2.720, lo que indica un rendimiento global eficiente y consistente. En los gráficos de caja, esperaríamos ver una caja de tamaño moderado, reflejando la eficiencia global de esta política con pocos valores atípicos.

- **Política Q**

La política Q muestra altos tiempos de almacenamiento con una media de 125.405 y una mediana de 125.405. La desviación estándar es de 530 y el IQR es de 751, indicando una dispersión moderada. Los gráficos de caja para TTA deberían mostrar una caja relativamente alta, reflejando cierta variabilidad en los tiempos de almacenamiento.

En términos de recuperación (TTRc), Q es eficiente con una media de 127.601 y una mediana de 127.624. La desviación estándar es de 524 y el IQR es de 692, lo que sugiere poca variabilidad. Los gráficos de caja para TTRc reflejan esto con una caja pequeña, indicando consistencia en la recuperación.

Para TTRb, Q también es eficiente con una media de 56.991 y una mediana de 57.006. La desviación estándar es de 1.610 y el IQR es de 2.178, reflejando que los tiempos de reubicación están bien controlados. Los gráficos de caja para TTRb muestran una caja pequeña, indicando poca dispersión y consistencia en los tiempos de reubicación.

Luego, en TTO, Q tiene una media de 309.997 y una mediana de 309.962. La desviación estándar es de 2.180 y el IQR es de 2.984, sugiriendo un rendimiento global eficiente y consistente. En los gráficos de caja, esperaríamos ver una caja de tamaño moderado, reflejando la eficiencia global de esta política con pocos valores atípicos.

## 8.2. Comparación Estadística de las Políticas de Reubicación

### 8.2.1. Decisión de Pruebas Estadísticas

Primero, se verifica si las métricas de las políticas siguen una distribución normal mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Luego, se evalúa la homocedasticidad, utilizando la prueba de Levene. El resultado de dichas pruebas se representa en la figura 15 y 16 respectivamente.

Si ambas condiciones se cumplen, se aplica la prueba ANOVA para comparar las medias de las métricas entre los grupos de políticas. Si alguna condición no se cumple, se usa la prueba de Kruskal-Wallis para comparar las medianas. En la tabla 9 se presenta la prueba aplicada y el resultado.

Tras identificar diferencias significativas, si los datos son paramétricos, se emplea la prueba de Tukey HSD para identificar qué políticas difieren específicamente. En caso de datos no paramétricos, se aplica la prueba de Dunn para determinar las diferencias específicas entre los grupos.

A continuación, se definen las hipótesis de las pruebas mencionadas.

Para las pruebas ANOVA:

- **Hipótesis Nula ( $H_0$ ):** La media de todas las políticas de reubicación son iguales en cuanto a la métrica de comparación.
- **Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ):** Al menos una de las medias de las políticas de reubicación es diferente en cuanto a la métrica de comparación.

Para las pruebas de Kruskal-Wallis:

- **Hipótesis Nula ( $H_0$ ):** Las distribuciones de todas las políticas de reubicación son iguales en cuanto a la métrica de comparación.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

- **Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ):** Al menos una de las distribuciones de las políticas de reubicación es diferente en cuanto a la métrica de comparación.

Para las pruebas de Tukey HSD:

- **Hipótesis Nula ( $H_0$ ):** No hay diferencia significativa entre el par de políticas de reubicación comparadas en cuanto a la métrica de comparación.
- **Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ):** Sí hay diferencia significativa entre el par de políticas de reubicación comparadas en cuanto a la métrica de comparación

Para las pruebas de Dunn con Corrección de Bonferroni:

- **Hipótesis Nula ( $H_0$ ):** No hay diferencia significativa entre el par de políticas de reubicación comparadas en cuanto a la métrica de comparación.
- **Hipótesis Alternativa ( $H_1$ ):** Sí hay diferencia significativa entre el par de políticas de reubicación comparadas en cuanto a la métrica de comparación.

Por convención se estable un nivel de significancia de 5% para evaluar las pruebas.

8.2.2. Resultados de Evaluación de Supuestos para ANOVA

Figura 15.

Evaluación de Supuesto de Normalidad (Kolmogorov-Smirnov).

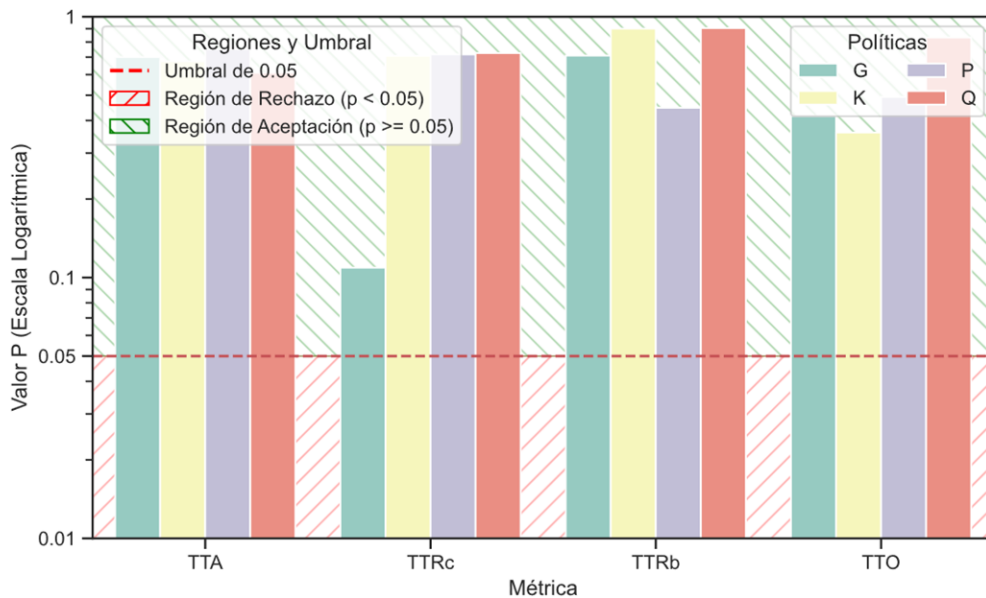
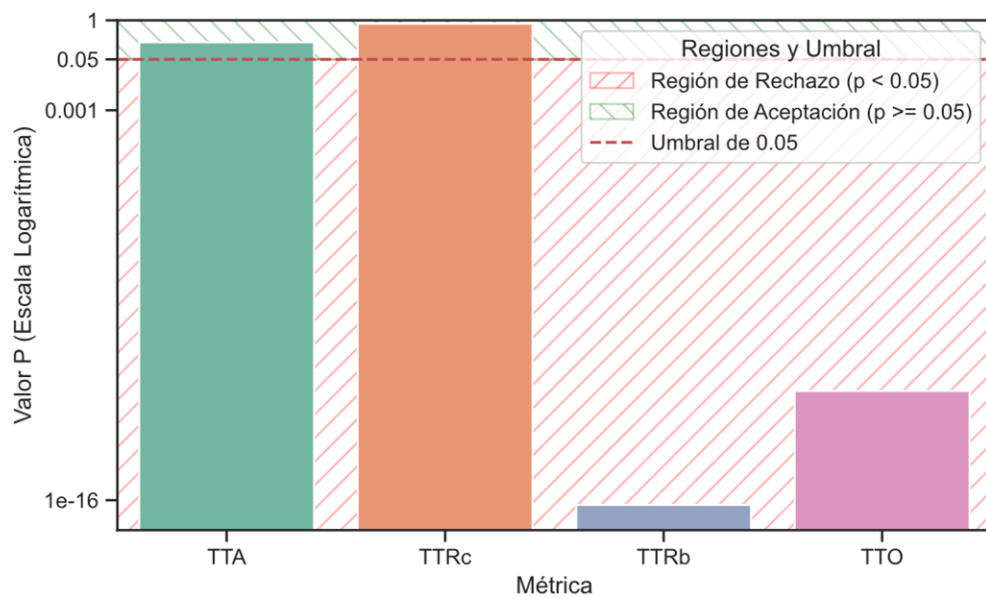


Figura 16.

Evaluación del Supuesto de Homocedasticidad (Levene).



## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

En la figura 15, se observa que la prueba de Kolmogorov-Smirnov, con un nivel de significancia del 5%, no proporciona evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de normalidad para ninguna de las métricas ni políticas de reubicación, lo que sugiere que las distribuciones son normales.

Adicionalmente, la figura 16 muestra los resultados de la prueba de Levene. A un nivel de significancia del 5%, esta prueba indica evidencia suficiente para sugerir igualdad de varianzas para las métricas TTA y TTRc. En contraste, para TTRb y TTO, se rechaza la hipótesis nula, revelando diferencias significativas en las varianzas, como se refleja claramente en la gráfica.

A partir de estos resultados, se establece el siguiente procedimiento de análisis:

- Se aplica la prueba ANOVA para las métricas TTA y TTRc, ya que cumplen con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas.
- Para las métricas TTRb y TTO, que no satisfacen la condición de varianzas iguales, se opta por la prueba de Kruskal-Wallis, que es una alternativa no paramétrica al ANOVA y no requiere suposiciones de normalidad ni homogeneidad de varianzas.

### 8.2.3. Evaluación de Diferencias Significativas entre Políticas

**Tabla 9.**

*Resultados de Pruebas ANOVA y Kruskal Wallis por Métricas.*

<b>Métrica</b>	<b>Prueba Utilizada</b>	<b>Valor p</b>	<b>Interpretación</b>
<b>TTA</b>	ANOVA	0	Evidencia de diferencias (Rechaza $H_0$ )
<b>TTRc</b>	ANOVA	0	Evidencia de diferencias (Rechaza $H_0$ )
<b>TTRb</b>	Kruskal-Wallis	0	Evidencia de diferencias (Rechaza $H_0$ )
<b>TTO</b>	Kruskal-Wallis	0	Evidencia de diferencias (Rechaza $H_0$ )

*Nota.* El valor p para las 4 entradas es extremadamente pequeño, entonces se redondea a 0.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

De acuerdo con la tabla 9, para todas las pruebas la hipótesis nula se rechaza, por lo cual se concluye de forma general que hay evidencia suficiente que por cada métrica de comparación hay al menos una política de reubicación que genera un impacto diferente. Adicionalmente, esto se puede presentar como un indicio de que la política de reubicación, además de impactar el tiempo de total de reubicaciones, también puede llegar a afectar el tiempo total de almacenamiento, recuperación y de operación en general.

Ahora bien, se continua con las pruebas *post hoc*, en la tabla 10 se resumen los resultados.

**Tabla 10.**

*Pruebas para Diferencias Significativas.*

Grupo 1	Grupo 2	Tukey HSD		Dunn con Corrección de Bonferroni	
		TTA	TTRc	TTRb	TTO
<b>G</b>	<b>K</b>	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$
<b>G</b>	<b>P</b>	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$
<b>G</b>	<b>Q</b>	Acepta $H_0$	Acepta $H_0$	Acepta $H_0$	Acepta $H_0$
<b>K</b>	<b>P</b>	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$
<b>K</b>	<b>Q</b>	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$
<b>P</b>	<b>Q</b>	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$	Rechaza $H_0$

De la tabla 10 se puede observar que la mayoría de las políticas son diferentes entre sí dado que, ya que la hipótesis nula es rechazada a excepción de la política G y Q, que en términos de las métricas parecen no tener diferencias significativas.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

**8.2.4. Evaluación de Eficiencia Operativa**

Una vez identificadas las diferencias significativas, se procede a evaluar la eficiencia operativa de las políticas. Para ello, se calculan los valores relativos de cada métrica, comparando cada valor con la media mínima de la métrica respectiva. Las políticas que presentan valores relativos menores indican una mayor eficiencia en términos de tiempo. En la siguiente tabla 11 se presentan los resultados.

**Tabla 11.**

*Diferencias Relativas entre las Métricas de las Políticas de Reubicación.*

<b>Política</b>	<b>TTA</b>	<b>TTRc</b>	<b>TTRb</b>	<b>TTO</b>
<b>G y Q</b>	6.29%	<b>Mejor</b>	<b>Mejor</b>	0.53%
<b>K</b>	0.57%	2.03%	55.04%	9.35%
<b>P</b>	<b>Mejor</b>	2.48%	4.62%	<b>Mejor</b>

*Nota.* Un mayor valor indica que es peor relativo a la política marcada como mejor.

- **Tiempo Total de Almacenamiento (TTA):** P muestra el mejor rendimiento en esta métrica, estableciendo la base de comparación. K es 0.57% más de tiempo que P en almacenamiento. G y Q son 6.29% más lentos que P en esta métrica.
- **Tiempo Total de Recuperación (TTRc):** G y Q demuestran el mejor rendimiento en recuperación, estableciendo la base para esta métrica. K es 2.03% más lento que G y Q en recuperación. P es 2.48% más lento que G y Q en esta misma métrica.
- **Tiempo Total de Reubicación (TTRb):** G y Q nuevamente muestran el mejor rendimiento, estableciendo la referencia para reubicación. P es 4.62% más lento que G y Q en reubicación. K es significativamente más lento, siendo 55.04% peor que G y Q en esta métrica.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

- **Tiempo Total de Operación (TTO):** P exhibe el mejor rendimiento general, estableciendo la base para el tiempo total de operación. G y Q son 0.53% más lentos que P en el tiempo total de operación. K muestra un rendimiento notablemente inferior, siendo 9.35% más lento que P en esta métrica global.

### 8.3. Resumen del Análisis

- **Política G y Q:** Ambas políticas son eficientes en la mayoría de las métricas, especialmente en TTRc y TTRb, mostrando poca variabilidad y alta consistencia. No presentan diferencias significativas entre sí.
- **Política K:** Aunque muestra eficiencia en TTA, es menos eficiente en TTRc, TTRb y TTO, con alta variabilidad en tiempos de reubicación y operación.
- **Política P:** Sobresale en TTA y TTO, mostrando consistencia y eficiencia. Sin embargo, tiene tiempos más altos en TTRc comparado con G y Q. En rendimiento general es la política recomendada.

En general, las políticas G y Q parecen ser las más consistentes y eficientes en términos de recuperación y reubicación, mientras que la política P es la mejor en almacenamiento y operación total. La política K, aunque eficiente en almacenamiento, muestra ineficiencias importantes en otras métricas. Esto puede indicar que considerar la lista de recuperación bajo el criterio propuesto no es una práctica eficiente. En cambio, se recomienda utilizar políticas de reubicación como G, Q, o P, que operan bajo criterios sencillos que arrojan mejores resultados.

## 9. Conclusiones

Desde el punto de vista del tiempo de operación, la política más eficiente es la reubicación aleatoria con minimización de varianza (P), seguida de cerca por las políticas de reubicación a la posición libre más cercana (G) y reubicación cerca al punto de entrada y salida (Q). Las políticas G y Q se consideran estadísticamente iguales.

En entornos donde se requiera almacenamiento rápido, la política P resulta ser la mejor alternativa. Por otro lado, si se necesita una recuperación rápida, las políticas G y Q son más eficientes en tiempo. Desde el punto de vista de la reubicación, la política P es un 4.62% más lenta que las políticas G y Q, lo que resalta su menor eficiencia en esta área específica.

La política K, siendo la alternativa propuesta, muestra un rendimiento inferior en comparación con las demás políticas evaluadas. Aunque K es solo un 0.57% más lenta que P en el almacenamiento, es notablemente menos eficiente en la recuperación, reubicación y tiempo total de operación. K es un 2.03% más lenta que G y Q en la recuperación, un 55.04% más lenta en la reubicación y un 9.35% más lenta en el tiempo total de operación.

Por lo tanto, la elección de la política de reubicación debe basarse en las prioridades operativas: para almacenamiento rápido, P es la mejor opción; para recuperación rápida, G y Q son más adecuadas; y para reubicación eficiente, G y Q son superiores a P.

Esto indica que considerar las listas de recuperación desde el enfoque propuesto en K no resulta eficiente desde el punto de vista de la medida de desempeño evaluada y los parámetros establecidos. Además, la política G, Q y P resultaron ser eficiente con criterios sencillos basados en las características físicas de la estantería, mientras que el criterio derivado de las listas de recuperación resultó ser un más complejo y presentando resultados poco favorables.

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

Por otra parte, la utilización del modelo conceptual de matrices de priorización y restricción permitió una representación precisa de las políticas de reubicación reduciendo la ambigüedad presente en las descripciones textuales tradicionales y facilitó la implementación algorítmica y evaluación de las políticas. Bajo este modelo conceptual se realizó la reconstrucción de las políticas de reubicación mencionadas en literatura y la formulación de política alternativa.

La herramienta de simulación desarrollada, con el enfoque de programación orientada a objetos, proporcionó una solución práctica para la experimentación y validación de las políticas de reubicación. Las pruebas realizadas mostraron consistencia en los resultados y permitieron identificar las políticas más eficientes.

Este trabajo aporta al campo de la optimización de sistemas de almacenamiento automatizados ya que se presenta como un estudio temprano en torno al problema de la reubicación. Además, se destaca la importancia del problema de reubicación, con base en los hallazgos acerca del impacto significativo en las métricas de tiempo, lo que indica que la elección de una política de reubicación no solo impacta el tiempo de las reubicaciones si no también los tiempos de almacenamiento, recuperación y de operación en general.

Si bien los resultados obtenidos son significativos, es importante considerar que la simulación se realizó bajo supuestos específicos que pueden no representar todas las condiciones posibles en un entorno real.

## 10. Recomendaciones

Para futuras investigaciones, se recomienda explorar la aplicación del modelo en diferentes configuraciones de AS/RS, evaluando el desempeño del sistema bajo diversas condiciones para asegurar la aplicabilidad de los resultados en una variedad de entornos operativos. Además, se sugiere considerar el uso de métricas adicionales, como el consumo energético y la eficiencia del espacio, para proporcionar una visión más completa de la efectividad de las políticas de reubicación. Es crucial desarrollar y probar nuevas heurísticas o algoritmos de reubicación que consideren factores dinámicos y estocásticos del entorno operativo, incluyendo la implementación de algoritmos de aprendizaje automático. También, se recomienda ampliar los estudios de simulación para incluir escenarios más realistas que reflejen la complejidad y variabilidad de los entornos operativos, incluyendo perturbaciones y variaciones aleatorias en la demanda y operaciones diarias para evaluar la robustez de las políticas propuestas. Es importante investigar el impacto de las políticas de reubicación no solo en el tiempo de operación, sino también en la eficiencia global del sistema, incluyendo el manejo de inventarios y la satisfacción del cliente, para entender mejor cómo estas decisiones afectan el rendimiento total del sistema. Además, en los hallazgos de este estudio se evidencio el impacto de la reubicación en las tareas de almacenamiento y recuperación, por lo puede resultar conveniente estudiar una política de control integral.

**Referencias bibliográficas**

- Bahos, N. & Blanco, B. J. (2019). Diseño y construcción de una maquina AS/RS para almacenamiento y extracción de artículos electrónicos de una bodega. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12749/7030>
- Bozer, Y. A., & White, J. A. (1984). Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems. IIE transactions, 16(4), 329-338.
- Córdoba, E. (2023). Optimización de un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación de doble plataforma desde la perspectiva del costo y tiempo de operación. Universidad Industrial de Santander.
- Dörr, K. (2018). Travel Time Models and Throughput Analysis of Dual Load Handling Automated Storage and Retrieval Systems in Double Deep Storage (Vol. 92). KIT Scientific Publishing. (pp. 25).
- Estrada, S., Ramírez, J. P. & Uribe, F. (2019). Modelo predictivo-reactivo para el control de un sistema de recolección de productos en bodega (AS / RS). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/45538>.
- Gagliardi, J.-P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2014). A simulation modeling framework for multiple-aisle automated storage and retrieval systems. Journal of Intelligent Manufacturing, 25(1), 193-207. <https://doi.org/10.1007/s10845-012-0686-x>
- García-Herreros, L. F., Lache, I. & Rodríguez, S. A. (2005). Diseño de un AS/RS (Automated Storage & Retrieval System) para implementación didáctica. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12749/14845>

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

- Gagliardi, J. P., Renaud, J., & Ruiz, A. (2012). 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>
- Godoy Hernández, R. D., & Rodríguez Quintero, W. (2007). Diseño y modelamiento de un robot cartesiano para el posicionamiento de piezas.
- Heskett, J. L. (1963). Cube-Per-Order Index A Key to Warehouse Stock Location. *Transportation and Distribution Management*, 3(1), 27-31.
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introduction to operations research* (9th ed). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Hsu, H.-P., Wang, C.-N., & Dang, T.-T. (2022). Simulation-Based Optimization Approaches for Dealing with Dual-Command Crane Scheduling Problem in Unit-Load Double-Deep AS/RS Considering Energy Consumption. *Mathematics*, 10(21). <https://doi.org/10.3390/math10214018>
- Laurence, M. & Tobón, J. M. (2013). Desarrollo de una plataforma para la actualización automática de inventarios del sistema de almacenamiento automático as/rs del Centro Tecnológico de Automatización Industrial CTAI. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/6328>.
- Lehmann, T., & Knötgen, P. (2020). Operating point analysis for the stock filling level of double-deep automated storage and retrieval systems | Betriebspunktuntersuchung des lagerfüllgrads eines doppeltiefen automatischen hochregallagers. *Logistics Journal*, 2020.
- Lehmann, T., & Hußmann, J. (2021). Travel time model for multi-deep automated storage and retrieval system with a homogeneous allocation structure<sup>12</sup>. *Logistics Research*, 14(5). [https://doi.org/10.23773/2021\\_5](https://doi.org/10.23773/2021_5)

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

- Lerher, T., Sraml, M., Potrc, I., & Tollazzi, T. (2010). Travel time models for double-deep automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 48(11), 3151-3172. <https://doi.org/10.1080/00207540902796008>
- Lin, Y., Wang, Y., Zhu, J., & Wang, L. (2021). A Model and a Task Scheduling Method for Double-Deep Tier-Captive SBS/RS with Alternative Elevator-Patterns. *IEEE Access*, 9. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120418>
- Manzini, R., Gamberi, M., & Regattieri, A. (2006). Design and control of an AS/RS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(7), 766-774. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2427-6>
- Navidi, W. (2022). *Estadística para ingenieros y científicos*. McGraw-Hill Interamericana. <https://www-ebooks7-24-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/?il=20755>
- Oser, J. & Ritonja, M., 2004, *Progress in Material Handling Research*. Charlotte, NC 28217, USA: The Material Handling Industry of America, p. 357-371
- Rincón, A. C. & Rodríguez, D. R. (2020). Diseño de un sistema de control para AGVs a utilizar en el marco de una emulación en un sistema de almacenamiento y recuperación automática (AS/RS). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10554/53213>.
- Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. A. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.038>
- Taha, H. A. (2017). *Investigación de operaciones*. Pearson Educación.
- Wang, Y., Zhang, R., Liu, H., Zhang, X., & Liu, Z. (2019). Task scheduling model of double-deep multi-tier shuttle system. *Processes*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/pr7090604>

## POLÍTICA DE REUBICACIÓN ALTERNATIVA

Wu, K.-Y., Xu, S. S.-D., & Wu, T.-C. (2013). Optimal scheduling for retrieval jobs in double-deep AS/RS by evolutionary algorithms. *Abstract and Applied Analysis*, 2013.

<https://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).

<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. (2016). Travel-time models and fill-grade factor analysis for double-deep multi-aisle AS/RSs. *International Journal of Production Research*,

54(14), 4126-4144. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1106604>