

# 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 Vera<sup>a</sup>, Edwin Garavito<sup>a</sup>, Edgar Córdoba<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Colombia

---

## Resumen

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.

**Palabras Clave:** AS/RS, Doble Profundidad, Política de Reubicación, Heurística, Sistemas Automatizados de Almacenamiento

---

## 1. Introducción

Los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS) han emergido como una solución crucial para la gestión eficiente de inventarios en el contexto de la Industria 4.0, proporcionando altos niveles de automatización y flexibilidad. Estos sistemas utilizan grúas automatizadas que se desplazan por estanterías estáticas para almacenar y recuperar unidades de carga, optimizando así el espacio y el tiempo de operación [1]. Sin embargo, uno de los principales desafíos que enfrentan los AS/RS es la reubicación de unidades de carga, especialmente en estanterías de doble profundidad, donde una unidad puede bloquear el acceso a otra, incrementando los tiempos de operación y el consumo energético. La literatura sobre AS/RS ha abordado diversas estrategias para mejorar su eficiencia. Lerher et al. (2010) [5] describen el problema de la reubicación y sus implicaciones sobre el nivel de ocupación del sistema y las estrategias de almacenamiento. Xu et al. [7] analizaron diferentes políticas de reubicación, incluyendo la reubicación aleatoria y la heurística del vecino más cercano. Otros estudios, como los de Gagliardi et al. (2014) [2], han propuesto modelos de simulación orientados a objetos para evaluar el desempeño de diferentes configuraciones de AS/RS. A pesar de estos avances, la necesidad de políticas de reubicación más eficientes sigue siendo un tema de interés. Las

políticas actuales a menudo no consideran factores críticos como las listas de recuperación y la variabilidad en la demanda. Este trabajo propone una política alternativa de reubicación basada en un modelo heurístico que incorpora estos factores, con el objetivo de reducir el tiempo de operación y mejorar la eficiencia general del sistema. Para validar la efectividad de la política propuesta, se realizaron simulaciones comparativas utilizando escenarios derivados de la literatura. Los resultados demuestran que las políticas más sencillas, en términos de criterios, tienden a ser más eficientes. Además, se encontró que la incorporación de listas de recuperación no aporta beneficios significativos, destacando la importancia de enfoques simplificados en la reubicación de unidades de carga. En resumen, esta investigación proporciona un marco para la evaluación e implementación de estrategias de reubicación más efectivas en sistemas AS/RS de doble profundidad, contribuyendo a la optimización de los sistemas de logística y gestión de inventarios en aplicaciones industriales.

## **2. Caracterización del Problema de Reubicación**

El problema de reubicación en sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS) de doble profundidad surge cuando se requiere acceder a una unidad de carga que se encuentra en la segunda línea de almacenamiento, y una unidad en la primera línea bloquea el acceso. Este problema es significativo porque las actividades de reubicación incrementan el tiempo total de operación y el consumo energético, afectando la eficiencia global del sistema. De acuerdo con Lerher et al. (2010) [5], el problema de reubicación está intrínsecamente ligado al factor de ocupación del sistema y a las estrategias de almacenamiento. Un factor de ocupación elevado aumenta la probabilidad de que se necesiten reubicaciones, lo que a su vez incrementa los tiempos de ciclo y reduce la eficiencia operativa. Por tanto, la elección de políticas de almacenamiento y reubicación adecuadas es crucial para minimizar el impacto negativo de estas reubicaciones. Xu et al. (2016) [8] analizan diversas políticas de reubicación, como la reubicación al azar y la heurística del vecino más cercano. Estas políticas tienen diferentes implicaciones en términos de tiempo de operación y complejidad de implementación. La heurística del vecino más cercano, por ejemplo, busca minimizar la distancia de reubicación, pero puede no ser siempre la opción más eficiente en sistemas con alta variabilidad de demanda. 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.

## **3. Propuesta del Modelo Conceptual**

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 Chebyshev 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.

### *3.1. Matrices de Priorización*

Las matrices de priorización se diseñan para asignar un valor a cada posición de la estantería, reflejando su conveniencia para el almacenamiento. Estos valores se determinan según diversos criterios, como la cercanía a un punto de referencia, utilizando una escala que se asemeja a una escala de Likert pero en formato matricial. La matriz no escalada mantiene las unidades originales del problema, pero se omiten las unidades y se enumeran por conveniencia, facilitando la toma de decisiones y evitando complicaciones con unidades complejas y dígitos decimales. La enumeración se realiza asignando el menor grado a la posición más cercana y el mayor grado a la más lejana.

### 3.2. *Matrices de Restricción*

Las matrices de restricción almacenan información de manera binaria, indicando si una posición es factible para el almacenamiento, recuperación o reubicación. Por ejemplo, una matriz de ocupación asigna el valor 1 a las celdas ocupadas y 0 a las vacías. Además, estas matrices pueden reflejar la zonificación de la estantería según políticas de almacenamiento por clases, especificando qué posiciones son factibles para cada clase de productos. Esto permite controlar la decisión de almacenamiento y reubicación según categorías específicas.

### 3.3. *Operación de Matrices*

La operación entre matrices de priorización y matrices de restricción se realiza mediante la multiplicación de Hadamard, que combina los valores de ambas matrices elemento por elemento. Esto limita el campo de alternativas al considerar simultáneamente la conveniencia y la viabilidad de cada posición. Por ejemplo, multiplicar una matriz de priorización con una matriz de restricción específica para una clase de productos resultará en una nueva matriz que conserva el criterio de cercanía pero restringe las alternativas a las zonas factibles.

### 3.4. *Supuestos del Modelo Conceptual*

1. **Aplicabilidad a diferentes profundidades:** El modelo se aplica tanto a estanterías de profundidad simple como de doble profundidad, y puede adaptarse a profundidades múltiples.
2. **División en planos:** En estanterías de doble profundidad, las posiciones se dividen en plano frontal y trasero, requiriendo un criterio adicional para priorizar el segundo plano.
3. **Escala de valores:** Las matrices de priorización utilizan una escala de valores que refleja la preferencia para la colocación de unidades de carga.
4. **Celdas enumeradas:** Las celdas en las matrices de priorización se enumeran de menor a mayor según el criterio de preferencia.
5. **Matriz binaria:** Las matrices de restricción son binarias, indicando la factibilidad de cada posición.
6. **Multiplicación de matrices:** La multiplicación entre matrices de priorización y restricción se realiza para limitar el campo de alternativas.
7. **Criterio de desempate:** En caso de empate en los valores de priorización, se utiliza un criterio de desempate, como la selección aleatoria.
8. **Superposición de matrices:** Se permite la superposición de múltiples matrices de priorización para representar criterios más complejos.

## 4. **Políticas de Reubicación Existentes**

Con base en la literatura y el modelo conceptual propuesto se realiza la reconstrucción de las políticas de reubicación.

### 4.1. *Reubicación Aleatoria con Minimización de Varianza (P)*

El autor Xu et al. (2016) [8], menciona el uso de la política reubicación aleatoria, sin embargo, no brinda muchos detalles de la lógica implementada, por otra parte, Lehmann & Hußmann (2021) [3], 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.

### 4.2. *Reubicación Cerca al Punto de Entrada y Salida (Q)*

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 acercarse al 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.

#### 4.3. *Reubicación a la Posición Libre Más Cercana (G)*

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.

#### 4.4. *Reubicación no Obstructiva con Minimización de Varianza (K)*

Este criterio de 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, 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.

### 5. **Política de Reubicación Propuesta**

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

#### 5.1. *Reubicación no Obstructiva con Minimización de Varianza (K)*

Este criterio de 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, 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.

### 6. **Proceso de Simulación con los Parámetros Fijados**

El proceso de simulación se llevó a cabo siguiendo un conjunto de pasos bien definidos y utilizando parámetros específicos para evaluar el rendimiento del sistema AS/RS de doble profundidad bajo diferentes políticas de reubicación. Se utilizó el modelo de simulación propuesto por Gagliardi et al. (2014) [2] como base para la implementación.

#### 6.1. *Supuestos del Modelo de Simulación*

El modelo de simulación opera bajo los siguientes supuestos:

1. **Secuencia de Operaciones:** La secuencia de operaciones se genera antes de correr la simulación.
2. **Orden de Ejecución:** El orden de las actividades de almacenamiento y recuperación se realiza según la secuencia de operaciones definida.
3. **Ejecución Continua:** Las actividades en la secuencia se ejecutan de manera continua, sin retrasos entre ellas.
4. **Aleatoriedad en la Secuencia:** La naturaleza aleatoria de la secuencia puede causar variaciones en la frecuencia de operaciones de almacenamiento y recuperación.
5. **Estrategia de Reubicación:** Se implementa una estrategia predeterminada cuando se solicita la recuperación de un ítem que está obstruido y no hay espacio disponible para reubicar el ítem obstructivo.

## 6.2. *Parámetros de Entrada*

Se definieron los siguientes parámetros de entrada basados en la literatura: el sistema cuenta con 18 filas y 20 columnas, con una cantidad de 2 celdas por canal[5]. Las dimensiones de las celdas son de 1.6 m de alto, 0.9 m de ancho y 1.1 m de profundidad[5]. La grúa opera a una velocidad de 1 m/s en filas, 1.5 m/s en columnas y 0.7 m/s por canal [5]. El factor de ocupación es de 0.85 [8]. La capacidad por clase es de 20 para clase A, 40 para clase B y 40 para clase C. La política de almacenamiento utilizada es la minimización de varianza [4] y la política de recuperación es FCFS (First-Come, First-Served) [6].

## 6.3. *Definición de Métricas*

Se utilizaron las siguientes métricas para evaluar el desempeño del sistema:

- **Tiempo Total de Almacenamiento (TTA):** Tiempo dedicado a todas las operaciones de almacenamiento.
- **Tiempo Total de Recuperación (TTRc):** Tiempo necesario para completar todas las operaciones de recuperación.
- **Tiempo Total de Reubicación (TTRb):** Tiempo empleado en todas las operaciones de reubicación.
- **Tiempo Total de Operación (TTO):** Suma del tiempo de almacenamiento, recuperación y reubicación.

## 6.4. *Proceso de Simulación*

1. **Configuración del Modelo:** Se utiliza el modelo de simulación planteado, configurado con los parámetros definidos.
2. **Ejecución de Simulaciones:** Para cada política de reubicación, se realizan 1000 réplicas para obtener resultados confiables. La secuencia a simular se establece como un factor de 10 de la cantidad total de ubicaciones para reducir el impacto de los estados iniciales.
3. **Recolección de Datos:** Durante la simulación, se registran y acumulan los tiempos de operación para cada tipo de actividad. Estos datos se recopilan al final de cada réplica.

## 7. **Análisis y Evaluación de Resultados**

El análisis y evaluación de los resultados se realizaron con base en los datos obtenidos durante el proceso de simulación, utilizando diversas pruebas estadísticas para comparar las políticas de reubicación en términos de sus métricas operativas.

### 7.1. *Análisis Descriptivo de las Políticas de Reubicación*

Para cada política de reubicación y métrica, se calcularon medidas de tendencia central y se representaron los datos mediante diagramas de caja (ver gráfica 1), con el fin de describir la distribución de los datos e identificar valores atípicos. En la Tabla 1 se presentan los resultados del análisis descriptivo.

### 7.2. *Evaluación de Supuestos para ANOVA*

La prueba de Kolmogorov-Smirnov se utilizó para evaluar la normalidad de las distribuciones, y la prueba de Levene se empleó para verificar la homogeneidad de varianzas. Los resultados mostraron que las métricas TTA y TTRc cumplen con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, mientras que TTRb y TTO no cumplen con la condición de varianzas iguales.

### 7.3. *Decisión de Pruebas Estadísticas*

Con base en los resultados de las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas, se decidió aplicar la prueba ANOVA para las métricas TTA y TTRc, y la prueba de Kruskal-Wallis para TTRb y TTO. Estas pruebas permitieron determinar la existencia de diferencias significativas entre las políticas de reubicación en cada métrica evaluada.

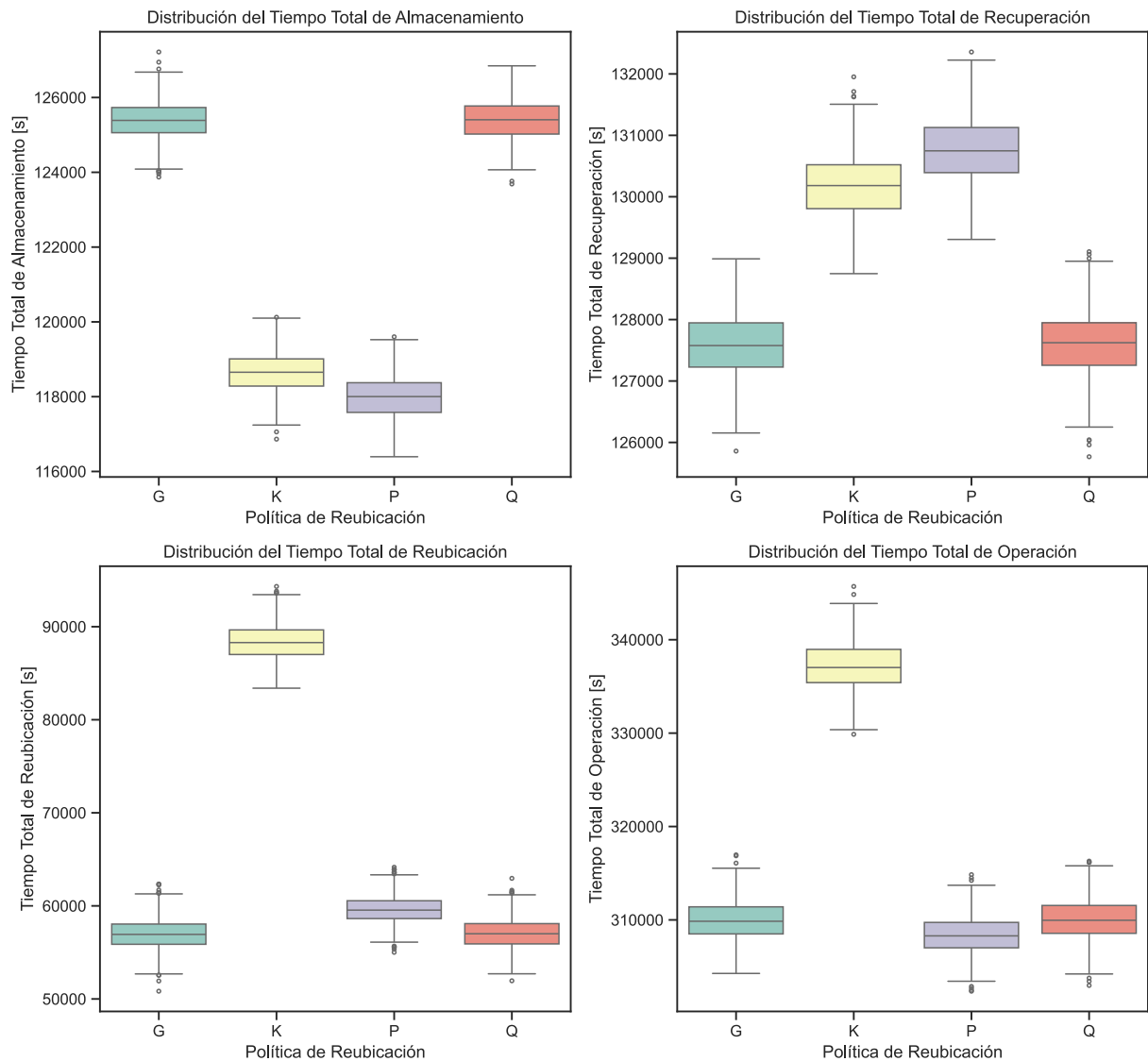


Figura 1: Distribución de las Métricas para cada Política de Reubicación.

#### 7.4. Evaluación de Diferencias Significativas entre Políticas

Los resultados de las pruebas ANOVA y Kruskal-Wallis indicaron que para todas las métricas, la hipótesis nula fue rechazada, evidenciando diferencias significativas entre las políticas de reubicación (Tabla 2). Se realizaron pruebas post hoc para identificar qué pares de políticas presentaban diferencias significativas.

#### 7.5. Evaluación de Eficiencia Operativa

Una vez identificadas las diferencias significativas, se procedió a evaluar la eficiencia operativa de las políticas. Para ello, se calcularon los valores relativos de cada métrica, comparando cada valor con la media mínima de la métrica respectiva. Las políticas que presentaron valores relativos menores indicaron una mayor eficiencia en términos de tiempo (Tabla 3).

Cuadro 1: Resumen de Métricas Descriptivas

Política	Métrica	Media	Desv. Est.
G	TTA	125.402	523
	TTRc	127.587	502
	TTRb	56.982	1.658
	TTO	309.972	2.133
K	TTA	118.663	539
	TTRc	130.178	520
	TTRb	88.344	1.918
	TTO	337.186	2.530
P	TTA	117.987	552
	TTRc	130.758	521
	TTRb	59.614	1.438
	TTO	308.359	1.973
Q	TTA	125.405	530
	TTRc	127.601	524
	TTRb	56.991	1.610
	TTO	309.997	2.180

Cuadro 2: Resultados de Pruebas ANOVA y Kruskal Wallis por Métricas

Métrica	Prueba	Valor p	Interpretación
TTA	ANOVA	0	Rechaza H0
TTRc	ANOVA	0	Rechaza H0
TTRb	Kruskal-Wallis	0	Rechaza H0
TTO	Kruskal-Wallis	0	Rechaza H0

Cuadro 3: Diferencias Relativas entre las Métricas de las Políticas de Reubicación

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

### 7.6. Resumen del Análisis

- **Políticas 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.

## 8. 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.

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.

## Referencias

- [1] K. Dörr. *Travel Time Models and Throughput Analysis of Dual Load Handling Automated Storage and Retrieval Systems in Double Deep Storage*. Vol. 92. KIT Scientific Publishing, 2018, pág. 25.
- [2] J.-P. Gagliardi, J. Renaud y A. Ruiz. "A simulation modeling framework for multiple-aisle automated storage and retrieval systems". En: *Journal of Intelligent Manufacturing* 25.1 (2014), págs. 193-207. doi: 10.1007/s10845-012-0686-x.
- [3] T. Lehmann y J. Hußmann. "Travel time model for multi-deep automated storage and retrieval system with a homogeneous allocation structure". En: *Logistics Research* 14.5 (2021). doi: 10.23773/2021\_5.
- [4] T. Lehmann y P. Knötgen. "Operating point analysis for the stock filling level of double-deep automated storage and retrieval systems — Betriebspunktuntersuchung des lagerfüllgrads eines doppeltiefen automatischen hochregallagers". En: *Logistics Journal* (2020).
- [5] T. Lerher et al. "Travel time models for double-deep automated storage and retrieval systems". En: *International Journal of Production Research* 48.11 (2010), págs. 3151-3172. doi: 10.1080/00207540902796008.
- [6] X. Xu et al. "Optimal dimensions for multi-deep storage systems under class-based storage policies". En: *Cluster Computing* 22.3 (2019), págs. 861-875. doi: 10.1007/s10586-018-2873-9.
- [7] X. Xu et al. "Travel time analysis for the double-deep dual-shuttle AS/RS". En: *International Journal of Production Research* 53.3 (2015). doi: 10.1080/00207543.2014.921351.
- [8] X. Xu et al. "Travel-time models and fill-grade factor analysis for double-deep multi-aisle AS/RSs". En: *International Journal of Production Research* 54.14 (2016), págs. 4126-4144. doi: 10.1080/00207543.2015.1106604.