

Estudio exploratorio sobre la clasificación de sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS) según las características del sector productivo

2181504 Leidy Tatiana Jaramillo Piza

2180236 Silvia Juliana Cabanzo Massey

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniería Industrial

Director

Laura Yeraldin Escobar Rodríguez

M. Sc. Ingeniería Industrial

Codirector

Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento

M. Sc. Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Ingeniería Industrial

Bucaramanga

2024

Lista de Tablas

Tabla 1 11

Lista de Apéndices

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

Resumen

Título: Estudio exploratorio sobre la clasificación de sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS) según las características del sector productivo

Autor: 2181504 Leidy Tatiana Jaramillo Piza, 2180236 Silvia Juliana Cabanzo Massey

Palabras Clave: Sistemas automáticos de almacenamiento y recuperación (AS/RS); logística; sector productivo; diseño; políticas de almacenamiento.

Descripción: Existe numerosos estudios sobre los AS/RS aplicados en los procesos logísticos en los que se agiliza la gestión de inventarios con gran precisión y eficiencia. Sin embargo, debido a la complejidad del sistema, puede resultar difícil para el gestor de decisiones identificar los elementos de diseño según la política de almacenamiento empleados en un almacén. Por ello, mediante una revisión exploratoria exhaustiva, se categorizó a los AS/RS en el sector logístico, enfocados en las características de diseño (factor importante a considerar para la aplicación) y clasificados según los tipos de almacenamiento. Como resultado, se evidencia que no existe un AS/RS exclusivo para una política de almacenamiento y viceversa, ya que la implementación de un sistema depende de las necesidades específicas de la empresa.

Abstract

Title: Exploratory Study on the Classification of Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS) According to Storage Allocation Policies in the Logistics Sector.

Author(s): 2181504 Leidy Tatiana Jaramillo Piza, 2180236 Silvia Juliana Cabanzo Massey

Key Words: Automated storage and retrieval systems (AS/RS); logistics; productive sector; design; storage assignment.

Description: A significant body of research has focused on AS/RS applied in logistics operations, where they enhance inventory management efficiency and precision. However, since AS/RS are complex, it is difficult for the decision-makers to identify design elements based on control features (storage management) used on warehouses. For this reason, this paper presents exploratory research incorporating categorization from a design perspective in the logistics sector (an important variable to consider for the correct application) and by storage assignment policy. As a result, present evidence demonstrates that there is no exclusive AS/RS for a storage policy and vice versa, because the implementation of this system depends of specific company needs.

Introducción

Un sistema de almacenamiento simplifica la gestión de inventarios, ya que tiene por objetivo satisfacer la demanda impuesta por los consumidores con el uso de equipos, labores eficientes, espacio y tecnología [1]. Con la aparición de los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS) desde el año 1950, los almacenes han podido adaptarse con mayor flexibilidad, densidad y tener un adecuado uso de espacio para satisfacer la demanda de los clientes.

Ahora bien, un AS/RS es un sistema de solución automatizada asistida por tecnología que recibe y dispone del inventario con una localización prediseñada de almacenamiento, donde hay alta precisión y rapidez para un rendimiento ideal [2]. Es por ello por lo que, dependiendo de las necesidades del usuario, existen diferentes tipos de AS/RS como la carga unitaria, mini-carga, estantería dinámica, carrusel, multi-pasillo, etc... De los cuales se hablará en este documento.

Luego, uno de los primeros retos que se tiene al adquirir un AS/RS es hacer que sea compatible con las decisiones de diseño debido a que cualquier error equivale a un incremento de costos y clientes insatisfechos [1]. De manera que deben abordarse correctamente para aprovechar al máximo todas sus ventajas.

Según la revista Forbes durante la pandemia del COVID 19 y post-pandemia se ha presentado un alto crecimiento e inversión en los sistemas de almacenamiento automatizados por parte de los sectores privados, debido a que ayudan a proveer una excelente experiencia al cliente pues los pedidos son despachados eficazmente y, adicionalmente se reducen costos. Por lo que, se espera un crecimiento del 10% en los próximos años en el uso de almacenes automatizados [2].

Como se puede evidenciar anteriormente, hay múltiples alternativas para implementar un AS/RS y cada una de ellas responde a distintas necesidades. Teniendo esto en cuenta, se resalta la

importancia de que el cliente (persona interesada en aplicar AS/RS en su compañía) posea claridad en las características, las ventajas y desventajas que podrían presentarse durante su funcionamiento.

En ese orden de ideas, este documento proporciona información (proveniente de literatura gris, científica y casos de estudio) sobre los tipos de AS/RS y las configuraciones de cada modelo enfocada en las decisiones de diseño pertenecientes al sector logístico y clasificados según las políticas de almacenamiento.

El artículo está organizado de la siguiente manera. Primero, breve introducción sobre el AS/RS, seguido del sector logístico, el cual es el tema de interés. Tercero, se detallan los tipos de sistemas automatizados enfocando la información en las características de diseño y clasificándolos en seis políticas de almacenamiento (aleatorio, dedicado, basado en clases, rotación completa y más cercano). Finalmente, en la sección 4 se concluye el estudio y se resumen los resultados.

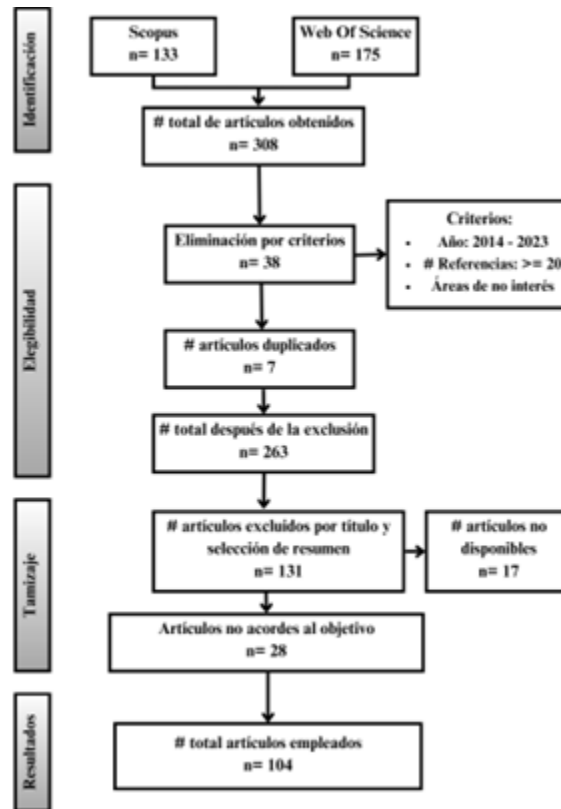
1. Materiales y Métodos

Para la elaboración de este estudio se usaron las bases de datos de Web of Science y Scopus, como las fuentes principales de información. Para ello, se emplearon equipos de cómputo para la realización de la investigación y la redacción del documento.

Adicionalmente, se elaboró una ecuación de búsqueda y se evaluaron los criterios de inclusión y exclusión para depurar el volumen información como se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Proceso depuración de la información



1.1 Estudio Exploratorio

Se considera un estudio flexible que tiene por objetivo formular el problema más preciso, aclarar conceptos, brindar nuevas ideas y familiarizar al investigador con el problema [3]. Tiene como ventaja obtener la información de un tema de interés para reducir el consumo de tiempo y energía del investigador [4].

En cuanto a este estudio se consideran las siguientes etapas: La primera, en la cual se realizó una revisión de literatura gris; Segunda, en la cual se hizo definición de la problemática de investigación en coherencia con los objetivos del estudio investigativo; Tercera, estrategia de búsqueda; Cuarta, extracción de información, e identificación de variables que responden a la pregunta de investigación en diversos sectores productivos bajo la estrategia de búsqueda definida;

y por último, la recopilación, presentación, análisis y debate de los resultados obtenidos, a través de un proceso que implica la síntesis de los hallazgos.

2. Resultados y discusión

2.1 Sector Logístico

La logística se ha convertido en una parte integral del proceso de producción moderno. Este término abarca desde la planificación, implementación, control del flujo eficiente y efectivo, continuando con el almacenamiento de bienes, servicios e información relacionada desde el punto de origen hasta el punto de consumo con el fin de cumplir con los requisitos del cliente.

Quizás de manera más crítica, la logística permite a las empresas llevar los productos adecuados al lugar correcto, en el momento adecuado, en las condiciones correctas y al costo adecuado. Por otro lado, el AS/RS es un sistema automatizado de manipulación de materiales controlado por una computadora que puede usarse para almacenar productos y/o materiales entrantes y recuperar unidades de mantenimiento de provisiones (SKU) sin manipulación directa de los trabajadores.

Ahora bien, cuando se habla de AS/RS es indispensable tratar el tema de logística, ya que dicho sector, aparte de desempeñar un papel fundamental en la gestión eficiente de la cadena de suministro y la distribución de productos, también se conoce por abarcar cuestiones amplias y diversas en campos industriales.

Considerando la información anterior se clasifica los tipos de AS/RS en el sector logístico mediante las políticas de almacenamiento (como se evidencia en la Tabla 1), las cuales se definen como un método para designar ítems a ubicaciones de almacenamiento [5].

A continuación, se mencionan las metodologías de almacenamiento tratar:

Almacenamiento aleatorio: Asigna de manera aleatoria en la primera ubicación disponible de la estantería. Aquí, todas las ubicaciones vacías tienen la misma probabilidad de tener unidades de carga entrantes para asignar. Si la ubicación más cercana es para usar, la primera vacía que se encuentre se usará para almacenar productos. Esta política se caracteriza por considerar una sola clase de productos [6].

Almacenamiento dedicado: Sirve para almacenar bienes de manera organizada. El operador está muy familiarizado con la ubicación de los bienes, de manera que la localización asignada para cada SKU es específica, y solo será ocupada por esos productos. Por lo que, para cada tipo de productos hay suficiente espacio reservado para acomodar el máximo nivel de inventario. Sin embargo, gracias a esto, la tasa de utilización del espacio es baja [6].

Almacenamiento basado en clases: Se clasifican los productos por número de clases, basados en diferentes criterios tales como número de ítems, nivel de la demanda, costo, etc... y se reserva una región específica para cada clase. Allí, se maneja un inventario con gran diferencia en la tasa de rotación, el tamaño de los bienes (con estándares específicos) y una tasa de utilización baja del espacio.

Almacenamiento de rotación completa: Esta política requiere conocer la tasa de rotación del inventario del próximo ciclo. Se encarga de seleccionar los productos ordenados por su frecuencia de rotación en orden decreciente. Se subdivide en:

- Transversal en pasillo (AAFT): Donde los productos se almacenan de manera que su rotación disminuye a medida que uno se adentra más en un pasillo de selección con respecto al punto recolección y depósito (P/D).
- Dentro del pasillo (WAFT): Donde la rotación de los productos disminuye a medida que uno se mueve hacia pasillos más alejados del primer estante de almacenamiento [7].

Almacenamiento más cercano: Maneja un uso desigual del espacio de almacenamiento, es decir, el material se almacena en el estante con la primera ranura vacía encontrada de tal forma que se reduce el tiempo total de desplazamiento (Solo si se maneja a una sola clase de producto) [8].

2.2. Tabla de resultados y discusión

La siguiente tabla presenta de manera concisa los autores que abordan cada tipo de AS/RS según la política de almacenamiento, teniendo en cuenta la información encontrada.

Tabla 1

Tipos de AS/RS del Sector Logístico

Tipos de AS/RS	Políticas de Almacenamiento				
	Aleatorio	Más cercano	Dedicado	Rotación	Por clases
Dos depósitos	[9]				
Multi-lanzaderas	[10] [11] [12] [13]	[14][15]			
3D Multi-profundo	[16] [17]				
FS/RS (cuatro vías)	[18]				
PSS (as/rs paralelo)	[19]				
Doble lanzadera	[14]				
Carga unitaria	[20], [21] [22] [23] [24] [25] [26]			[23]	[27]
AVS/RS	[28]				
SBS/RS con Ciclo de Comando Único y Ciclo de Comando Doble	[29]				
SBS/RS Nivel-a-Nivel y SBS/RS Nivel-Captivo	[30] [28] [31] [32]	[32]			[33] [34]
Multi-pasillos					[35] [36]
Sistema de Transporte de Doble Profundidad y Múltiples Niveles					[37]
Estantería de flujo				[38]	[36]
Sistema de lanzaderas con pasillo entre pasillos		[39]			
Módulo de Elevación Vertical (VLM)		[40]			
Extremo de pasillo (EOA)		[41]		[42]	
Almacén vertical			[43]		
Sistema de Lanzaderas de Itinerario Completo (FRS)			[44]		

Sistema Robótico de Cumplimiento (RMFS)			[45]		
Grúas de paso de dos pasillos (TPC-AS/RS)			[46]		
Carruseles			[47]		
Empaque de carga					[48]
Dual-Command Crane in a Unit-Load Double-Deep AS/RS		[49]	[49]		
AS/RS	[50] [51] [52] [53] [54]	[55]		[48]	[56] [57]
MIAPP-AS/RS	[58]				
Single-directional Flow-rack (SFR) / Bi-directional flow-rack (BFR)	[59]				[59]
Multi-niveles		[60]			
Múltiples estanterías			[20]		

Gracias a la inmersión teórica realizada, se evidencia que: solo se puede utilizar almacenamiento aleatorio para una sola clase de producto, en el almacenamiento por clases y dedicado es necesario categorizar los artículos y el almacenamiento de rotación completa requiere conocer de antemano la tasa de rotación de los productos. Es por esto que la política de asignación más cercana es la que proporciona mayor adaptabilidad y flexibilidad, ya que no posee un requerimiento exclusivo. Sin embargo, no se considera que exista un almacenamiento que responda solo a un tipo de AS/RS; ni tampoco se encuentra un diseño físico destinado exclusivamente a un tipo de almacenamiento (a pesar de los AS/RS comparten características).

Por otra parte, es importante discutir acerca del tipo de AS/RS más utilizado por las empresas y el más flexible. Con base en esta investigación, se puede decir que gracias sus características de diseño es el SBS/RS, ya que acepta cambios en su funcionamiento mientras está en proceso de ejecución (como añadir número de lanzaderas y reordenar su ubicación), facilitando la respuesta a las variaciones de la demanda que se puedan presentar.

Ahora bien, se puede decir que los sistemas que involucran robots, elevadores y vehículos autónomos y los que solo usan grúas responden a las mismas políticas de almacenamiento. Pues la diferencia principal radica en la relación entre las características de diseño de los AS/RS y las particularidades de los tipos de almacenamiento.

A continuación, se categorizan los tipos principales de AS/RS (y de los cuales se encuentra más estudios) en el sector logístico a partir de las metodologías de almacenamiento mencionadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, enfocándose en las características de diseño de cada uno de ellos.

2.2 Tabla de Resultados y Discusión.

La siguiente tabla presenta de manera concisa los autores que abordan cada tipo de AS/RS según la política de almacenamiento, teniendo en cuenta la información encontrada.

2.2.1. Almacenamiento aleatorio

2.2.1.1. Dos depósitos

Menciona Xiaoyi Man et al. [9] que el sistema cuenta con dos depósitos que están ubicados en los dos lados de los estantes de contenedores. Para la tarea de almacenamiento, el sistema cuenta con un camión que transporta desde un depósito a un transbordador. Luego, la máquina de almacenamiento/recuperación (S/R) recoge la carga del transbordador, se mueve a lo largo de las pistas del pasillo del estante y la apila en un espacio predeterminado.

Para la tarea de recuperación, la máquina S/R descarga en el estante, se mueve a lo largo de las pistas del pasillo y envía la carga a un transbordador. Luego, un camión la transporta desde el transbordador hasta un depósito. Además, cada máquina S/R puede moverse en las dimensiones X e Y simultáneamente. También hay transbordadores moviéndose en la dimensión Z.

El sistema se caracteriza por determinar la secuencia de la máquina S/R y minimizar su tiempo de viaje, ya que solo hay un dispositivo S/R que se mueve a lo largo de la pista entre los dos depósitos y procesa los contenedores de almacenamiento y recuperación.

Por lo general, la ubicación del estante de cada tarea y el depósito de destino del almacenamiento se generan aleatoriamente en una distribución uniforme, por eso este tipo de AS/RS se clasifica en la política aleatoria de almacenamiento.

La ventaja principal es la eficiencia de la máquina S/R ya que esta se moviliza en las dimensiones X, Y y Z. Lo que quiere decir que el tiempo de viaje entre dos ubicaciones equivale a una distancia de movimiento de la máquina S/R.

2.2.1.2. Multi-lanzaderas

Según Polten et al. [10] en el Multi-lanzadera la grúa tiene la capacidad de recoger en el punto E/S múltiples unidades de carga simultáneamente para colocarlos en almacenamiento, después, la máquina se mueve a una posición vacía para dejar uno de los artículos y luego se dirige a una de las ubicaciones específicas donde recoge la mercancía. Allí, se toma el artículo a recoger del estante y el espacio ahora vacío se llena con un nuevo producto para ser almacenado (política de almacenamiento aleatorio). El objetivo más común en la programación de grúas de AS/RS es la minimización del tiempo total de proceso [61]. Esto garantiza un procesamiento rápido del lote de solicitudes y libera la grúa para el siguiente pedido.

Ahora bien, para el multi-lanzaderas la mayor ventaja es que proporciona un rendimiento óptimo y la desventaja es que si se llega a aumentar el número de lanzaderas, se generará una mayor inversión y un mayor costo de mantenimiento operativo.

En este sistema existe una subcategoría conocida como doble-lanzadera el cual puede transportar dos cargas unitarias a la vez. Esto implica que es posible realizar más de una operación simultáneamente. El aumento en el número de operaciones de almacenamiento y recuperación realizadas durante un viaje conduce a un tiempo de desplazamiento vacío reducido y, consecuentemente, a una mayor eficiencia operativa [14].

En particular, para los sistemas doble-lanzaderas, las características de diseño corresponde a que:

- Tienen grúas de motores independientes en ambos ejes, lo que les permite viajar horizontal y verticalmente simultáneamente.
- Todas las ubicaciones de almacenamiento tienen la capacidad física de almacenar cualquier artículo y utilizan almacenamiento aleatorio.
- La longitud medida en segundos del almacén es mayor que la altura.
- Se consideran estantes de una sola profundidad y la utilización es del 100%. El número de pallets en el sistema es constante.
- Cada punto E/S es capaz de atender tanto solicitudes de almacenamiento como de recuperación.

Para finalizar se puede concluir que estos tipos de AS/RS cuentan con un tiempo eficiente en el viaje de las máquinas S/R, el cual es un parámetro clave para la efectividad de un almacén [38]. Sin embargo, hay que considerar que es importante abordar los doble-lanzadera con estantería de una sola profundidad, ya que esto conlleva a una predicción más precisa del tiempo de desplazamiento; generando beneficios significativos como la realización de las operaciones de manera más efectiva.

2.2.1.3. AS/RS con múltiple profundidad 3D

Ghomri et al. [38] define que un AS/RS de profundidad múltiple permite almacenar artículos individuales como cargas en pallets o contenedores. El sistema consta de celdas, cada una equipada con un transportador y dos máquinas S/R. El almacenamiento se realiza en un conjunto de celdas con transportadores accesibles por ambos extremos, el cual por un lado se realiza la carga y por el otro, la recuperación.

Peng Yang et al. [16] sostiene que el AS/RS con múltiple profundidad, cuenta con diversos mecanismos de movimiento de profundidad (DMM) automatizados (es decir, que un ítem puede verse obstaculizado por otro al ser manipulado) que facilitan los movimientos de las cargas unitarias en la dirección vertical. Este sistema reduce la cantidad de pasillos necesarios y aumenta la densidad de almacenamiento, siendo especialmente útil en compañías con limitaciones de espacio. Además, posee un punto E/S y una máquina S/R que utiliza movimientos horizontales y verticales independientes.

El diseño de las dimensiones del estante de almacenamiento 3D con múltiple profundidad, es el primer problema de toma de decisiones para la construcción, ya que la optimalidad de la proporción del estante afecta significativamente la eficiencia operativa del almacén.

El diseño óptimo según Yu y De Koster [62] para este tipo de AS/RS es:

- El punto E/S del estante 3D está ubicado en la esquina inferior izquierda de la repisa. Cuando la grúa está inactiva, la máquina S/R se estaciona en el punto E/S.
- La cinta transportadora puede mover cargas unitarias en una dirección ortogonal de profundidad, independientemente del movimiento de la máquina S/R, a una velocidad constante.

- La máquina S/R opera sobre la base de un solo comando (no se permiten múltiples paradas en el pasillo).
- Cada carga unitaria contiene solo un tipo de artículo. Todas las ubicaciones de almacenamiento y las cargas unitarias tienen el mismo tamaño.

2.2.1.4. FS/RS (Cuatro vías)

El sistema de almacenamiento y recuperación de cuatro vías (FS/RS) hace que la tecnología de almacenamiento automático intensivo se desarrolle en una dirección más eficiente e inteligente; pues depende principalmente de un ascensor y de una lanzadera en cada piso para completar la tarea de programación.

El FS/RS consta de lanzaderas de cuatro vías, elevadores, estantes de varios pisos tipo riel, puntos E/S, áreas de caché, transportadores y otros equipos de hardware automatizados, así como sistemas de control de almacenes, sistemas de gestión de almacenes y otros componentes de software.

Cabe mencionar que la lanzadera de cuatro vías, como equipo principal, es flexible, porque puede programar dinámicamente el vehículo en estado de carga o sin carga en tiempo real mediante instrucciones de operación internas para conducir en las cuatro direcciones: adelante, atrás, izquierda y derecha por la pista en el piso, y detenerse con precisión en la posición objetivo. Esta lanzadera, es responsable del transporte horizontal, y el ascensor responde al transporte de dirección vertical.

Según Jiaorong Song et al. [18], generalmente en el FS/RS:

- Las lanzaderas de cuatro direcciones y el ascensor se mueven a velocidad constante.

- La lanzadera de cuatro vías está ubicada en cada piso en el punto E/S, y el elevador está ubicado en el primer piso.
- Las mercancías se almacenan al azar.

Finalmente, las ventajas del FS/RS son: Reducir el tiempo total de viaje de las operaciones de salida de pedidos y mejorar la eficiencia de programación del transporte del sistema combinado con la tarea de salida específica. De manera que, el proceso de operación del sistema se puede describir como: determinar la ubicación de destino de todos los bienes a salir.

2.2.1.5. PSS (AS/RS en paralelo)

Xiaofei Kou et al. [19] menciona que el sistema de servicio en paralelo (PSS) es excelente para almacenar y recuperar cargas unitarias. Las empresas pueden encontrarlo en depósitos que almacenan y recuperan productos con alta rotación. El modelo PSS consta de tres partes: el sistema de recuperación automatizado (ARS), el sistema de almacenamiento automatizado (ASS) y los bastidores de almacenamiento compactos (CSR).

El ARS está formado por unas cintas transportadoras horizontales y un tornillo sin fin vertical. Cada nivel tiene una cinta transportadora, la cual entrega las cargas unitarias salientes al transportador de tornillo; después, las cargas unitarias se recolectan y se entregan a la estación de salida.

Por otro lado, el sistema ASS se compone de un elevador de carga unitaria, un estante intermedio y un riel. Los productos entrantes se transmiten mediante el elevador de carga unitaria al nivel designado en el estante intermedio. En el CSR, cada carril está equipado con un transportador motorizado para transportar la carga desde el lado de entrada hasta el extremo de salida.

De hecho, el PSS se diferencia considerablemente del AS/RS convencional porque consta de una cinta transportadora horizontal en cada hilera, y un sinfín vertical en un lateral del estante. Esto convierte la recuperación del producto en un proceso paralelo, lo que aumenta considerablemente la eficiencia. En segundo lugar, los procesos de recuperación y almacenamiento en este sistema son independientes, garantizando un alto rendimiento.

En otras palabras, la mayor ventaja de PSS está en su trabajo paralelo y la separación de las operaciones de almacenamiento y recuperación, los cuales son principios de su diseño. El PSS generalmente considera que:

- El estante de almacenamiento tiene una cara de recogida rectangular continua y en el sistema se utiliza la política de almacenamiento aleatorio.
- La longitud y la altura del estante de almacenamiento son lo suficientemente largas para que la lanzadera y el elevador alcancen la velocidad máxima desde la estación de entrada.
- El tiempo de recogida y depósito de una determinada unidad de carga es conocido y constante.

Por último, el beneficio directo para las empresas que emplean PSS es que es excelente para almacenar y recuperar cargas unitarias. Además de que las compañías pueden basar su análisis de costos y su toma de decisiones en la medición de eficiencia del AS/RS.

2.2.1.6. Carga unitaria

Este sistema cuenta con un pasillo de dos estantes servidos por un robot, una cinta transportadora y una máquina de almacenamiento/recuperación (S/R). La mercancía se almacena en pallets, constituyendo así las cargas unitarias. Todos los estantes de almacenamiento tienen el mismo tamaño y número de ubicaciones, donde cada una contiene solo un artículo o producto de carga unitaria. La estación del punto E/S está posicionada en la esquina inferior izquierda de la

cara del estante en ambos lados del pasillo, en las coordenadas (0, 0), y hay suficiente espacio de búfer para cargar/descargar productos. Los artículos comprados a diferentes proveedores deben ser almacenados, por lo que llegan al punto E/S en montacargas y esperan a un robot para recogerlos y ponerlos en la cinta transportadora [20].

Ahora bien, según Roozbeh, Nia, et al. [21] tienen en cuenta las siguientes consideraciones para carga unitaria AS/RS:

- La máquina S/R opera en ciclos de comando doble (DC) y puede transportar solo una carga unitaria.
- Al inicio de un turno de trabajo, la máquina S/R se encuentra en la estación de E/S y no puede detenerse mientras realiza un ciclo.
- Las ubicaciones de los artículos para almacenamiento o recuperación son desconocidas en los estantes (asignación de almacenamiento aleatorio).
- Para poder realizar un DC, es necesario que la cantidad total de artículos a almacenar sea igual a la cantidad total de los artículos solicitados.
- Se conoce la cantidad de artículos en el pedido de un cliente.

2.2.1.7. AVS/RS

Yetkin E. [28] menciona que un sistema de almacenamiento y recuperación de vehículos autónomos (AVS/RS) tiene una alta tasa de transacciones debido a tener un transbordador independiente en cada nivel de un pasillo.

Este AS/RS es utilizado generalmente para transacciones de carga unitaria pesada y cuenta con un modelo de ecuación para predecir la proporción de los ciclos DC, en este caso, dichos ciclos hacen referencia al tiempo de viaje de la mesa elevadora que varía dependiendo de si las

operaciones (almacenamiento y recuperación) están en la misma región o en regiones diferentes. Cuando están en la misma región, implica recoger la caja en la ubicación E/S, moverla al nivel de destino, dejarla en una posición temporal, viajar vacío a la ubicación de recuperación, recoger la caja en la posición de recuperación, moverla a la posición de E/S y dejarla allí.

Los almacenes que utilizan AVS/RS suelen tener un área de gran altura con un espacio pequeño y procesan transacciones por pallet (plataformas horizontales que sirven como base para almacenamiento y transporte de mercancías) y contenedores cuyos principales componentes son un grupo de vehículos autónomos (AV), elevadores y estanterías de almacenamiento por ambos lados del pasillo en cada nivel. Los AVS/RS proporcionan movimientos horizontales en un nivel y los elevadores realizan los desplazamientos verticales.

Los ascensores utilizan la programación de ciclos DC, en el cual cada pasillo tiene un punto E/S. Por lo tanto, las transacciones llegan a la estación E/S del pasillo preasignado. Además, se considera que:

- Cada nivel de un pasillo tiene un transbordador que sirve para el proceso de almacenamiento y recuperación.
- Una política de almacenamiento puramente aleatoria.
- La ubicación E/S está ubicada en el primer nivel de cada pasillo.
- Hay dos posiciones de búfer en cada nivel donde las mesas elevadoras descargan y cargan.

2.2.1.8. SBS/RS con Ciclo de Comando Único y Ciclo de Comando Doble

La estructura básica de los sistemas de lanzaderas basados en el almacenamiento y recuperación (SBS/RS) está compuesta por estanterías de almacenamiento (SR), un ascensor con la mesa elevadora que transporta cajas verticalmente, transportadores de lanzadera que llevan las

cajas horizontalmente, posiciones de almacenamiento temporal en cada nivel, transportadores de acumulación (AC) y puntos E/S.

Los SBS/RS pueden manejar el ciclo de comando único (SCC) donde se asigna una tarea de almacenamiento o de recuperación realizada entre dos visitas consecutivas a la estación E/S. O un ciclo de comando dual (DCC), en la cual la máquina S/R almacena la primera carga unitaria, viaja vacía a una ubicación de recuperación y recoge la segunda carga unitaria.

- La política de almacenamiento y recuperación es aleatoria.
- La ubicación del punto E/S de la mesa elevadora del ascensor está en el punto medio del ascensor.
- La mesa elevadora y la lanzadera operan en ciclos de comando único y doble, y llevan una caja a la vez.
- La longitud y altura de la estantería son lo suficientemente grandes como para que la mesa elevadora y las lanzaderas alcancen su velocidad máxima.

En comparación con los AS/RS tradicionales de mini-carga, los sistemas SBS/RS pueden lograr un mayor volumen de almacenes y capacidad de rendimiento, lo que les permite hacer frente a volúmenes en constante cambio. Sin embargo, esto requiere una mayor inversión de capital y costos de mantenimiento. Todo lo anterior ha sido afirmado por Ma et al. [29].

2.2.1.9. SBS/RS Nivel-a-Nivel y SBS/RS Nivel-Captivo

Yunsoo Ha & Junjae Chae [30] mencionan que los SBS/RS pueden aumentar la capacidad de rendimiento mediante el uso de múltiples traspordadores y elevadores como máquinas de almacenamiento y recuperación (SRMs). También pueden facilitar mejoras en la flexibilidad, ya que pueden ajustar el número de SRMs según las demandas de transacciones.

Los SBS/RS se pueden dividir en dos tipos: SBS/RS de nivel-captivo y SBS/RS de nivel a nivel. En los SBS/RS de nivel-captivo, todos los niveles tienen un trasbordador individual. En los SBS/RS de nivel a nivel, el sistema tiene menos trasbordadores que niveles. Por lo tanto, determinar con precisión el número de trasbordadores es un tema importante en los SBS/RS de nivel a nivel, a diferencia de los sistemas de nivel-captivo que emplean un número fijo de trasbordadores.

En el SBS/RS de nivel a nivel, la capacidad del sistema depende de la capacidad del elevador. A su vez, es necesario controlar la posición de las lanzaderas porque se movilizan simultáneamente entre los niveles, lo que puede generar el fenómeno de retraso y bloque, que causa una ineficiencia operativa significativa en el sistema.

Ahora bien, los SBS/RS a menudo manejan las siguientes características:

- El SBS/RS está compuesto por dos elevadores y varios trasbordadores (el número máximo es igual al número de niveles).
- El trasbordador y el elevador operan de forma independiente y cada uno maneja una carga a la vez.
- El sistema maneja múltiples pedidos simultáneamente utilizando diversos recursos.
- El trasbordador puede moverse bidireccionalmente dentro de un nivel y maneja SC y DC.
- Todas las cargas (contenedores) son idénticas.
- El elevador solo puede manejar un SC debido a la dirección del transportador.
- Se aplica una política de asignación aleatoria.

2.2.2. Almacenamiento basado en clases

2.2.2.1. Multi-pasillo

El multi-pasillo es una de las formas más comunes de AS/RS porque tiene una alta capacidad de almacenamiento y posee varios pasillos con estanterías por ambos lados. Una o más máquinas S/R trabajan a lo largo de las vías curvas y seleccionan los productos de las estanterías de almacenamiento.

El sistema se compone principalmente de pasillos, máquinas S/R, estantes, puntos E/S y sistemas de control [63]. Por lo general, las estanterías de almacenamiento en el centro del depósito están emparejadas y separadas por pasillos de selección mientras que las estanterías de almacenamiento en los dos extremos tienen solo un lado.

Cada estantería de almacenamiento tiene varias capas y columnas, que las dividen en muchas unidades de almacenamiento. Las unidades de almacenamiento tienen el mismo tamaño y se utilizan para almacenar productos. Cada una tiene un código de ubicación único que puede identificar el sistema de control (almacenamiento basado en clases).

Por lo general, el multi-pasillo utiliza el siguiente modelo según Xiaohui Yan et al.[35].

- El punto E/S está ubicada en un lado del almacén y solo hay una máquina S/R y se mueve simultáneamente en las direcciones horizontal y vertical.
- Para mejorar la eficiencia de recogida, la mayoría de las máquinas S/R suelen tener más de un portador. Pueden cargar y transportar más de un producto al mismo tiempo.

Por otro lado, el multi-pasillo cuenta con una restricción de secuencia de tareas tanto entrantes como salientes; por lo tanto, es necesario tener clara la clasificación y asignación de

pedidos. Esta es la razón principal por la cual la mejor política de almacenamiento para este sistema es la basada en clases.

2.2.2.2. Sistema de transporte de doble profundidad y múltiples niveles

Este AS/RS se compone de estanterías de doble profundidad, lanzaderas y elevadores. Cada la lanzadera se encarga de desplazar horizontalmente y transportar unidades de mantenimiento de stock (SKU) hasta el punto E/S correspondiente en el nivel del pasillo. Mientras, que el elevador se encarga del movimiento de los SKU en dirección vertical, transportando mercancías desde el punto E/S hasta la plataforma de almacenamiento.

Este sistema reduce el tiempo total de las tareas de recuperación y de producción de cada línea de ensamblaje, asegurando que la duración final sea mínima, si cada fila ha completado todas sus tareas de recuperación.

Como beneficio, utilizando el almacenamiento más cercano, el sistema mejora la capacidad de almacenamiento sin obstaculizar la preparación de pedidos de salida, contando con menos pasillos para un uso eficiente del espacio. Además, maneja dos modos operacionales: modo de operación único para tarea de salida o entrada en una misma ventana de tiempo y operación compuesta donde ocurren simultáneamente las operaciones de salida y entrada. Todo lo anterior mencionado por Wang et al. [37].

2.2.3. Almacenamiento de rotación completa

2.2.3.1. Estantería de flujo

Una estantería de flujo se caracteriza por que se compone de un solo estante de varias profundidades, compuesto por celdas inclinadas configuradas y cada una puede contener varios elementos colocados uno tras otro. En su diseño los artículos son introducidos en un extremo del

estante conocida como cara de almacenamiento, y se desplazan al largo de los transportadores de gravedad hasta llegar al otro extremo, la cara de recuperación. Las máquinas S/R se desplazan en las coordenadas de los planos (x-y) para acceder a cualquier celda en el bastidor. Aquí, las estaciones de entrega y recogida se ubican en la cara de almacenamiento y recuperación del estante.

La estantería ofrece beneficios significativos como ser un sistema versátil en el que se almacenan diversos tipos de artículos y por su diseño físico, ocupa poco espacio, ya que requiere solo dos máquinas S/R. Sin embargo, se considera un sistema complejo y costoso por su de diseño.

2.2.4. Almacenamiento dedicado

2.2.4.1. Almacén vertical

Según Antomarioni et al. [43] el AS/RS aplicado en un almacén vertical se divide en tres módulos:

- La unidad de manipulación de la máquina consiste en un carro vertical equipado, que activa el movimiento ascendente y descendente sobre el cual se mueve el carro horizontal.
- Los codificadores absolutos, son dispositivos electrónicos que controlan y dan la posición exacta del eje en todo momento.
- Las bandejas son la unidad de almacenamiento gestionada por el almacén, tienen capacidad máxima de 550 bandejas.

El sistema implementa la minería de reglas de asociación (ARM), que determina que elementos deben asignarse en una misma repisa, definiendo los pares de artículos que van con frecuencia juntos. Este enfoque busca reducir el tiempo de selección y de inactividad. Es esencial destacar que la ARM se utiliza para seleccionar los elementos que se eligen con más frecuencia y aquellos que tienen una relación fuerte.

Por último, se puede decir que el AS/RS en un almacén vertical tiene beneficios como: Un proceso de selección más fluido y rápido sin comprometer la saturación del sistema; dado que los artículos están contenidos en SKU de un solo producto, la probabilidad de cometer errores es menor. De hecho, la interfaz del sistema indica el SKU desde el cual se debe recoger el artículo, lo que ayuda al operador a ejecutar el proceso de selección correcto.

2.2.4.2. Sistema de lanzadera itinerario completo (FRS)

Un FRS de ciclo doble se compone de dos pasillos transversales en cada nivel, dos ascensores y dos estaciones de trabajo. Su funcionamiento, implica que las lanzaderas pueden moverse a lo largo del pasillo transversal hasta el pasillo de almacenamiento deseado. Aquí, una lanzadera recorre el corredor, para almacenar y luego para recuperar un contenedor de producto. Posteriormente, se dirige al pasillo transversal frontal y luego al ascensor. Este último está conectado al riel y funciona como búfer ofreciendo espacio para unas lanzaderas en espera hasta que llegue el ascensor. Finalmente, la lanzadera se transporta al nivel de la estación de trabajo, donde descarga el contenedor y luego carga otro producto. Una vez completada la carga, el ascensor se dirige a un nivel diferente y el ciclo de la lanzadera se repite [44].

Una de las características destacadas de este sistema es la movilidad de sus lanzaderas itinerarias, que, no se limitan a una parte específica del área de almacenamiento, sino que pueden llegar a cada lugar en el espacio de almacenamiento. Por lo tanto, permite que múltiples sistemas de manejo de almacenes (SRMs) pueden recuperar contenedores de productos simultáneamente desde cualquier pasillo en cualquier nivel, lo que mejora la eficiencia del sistema.

2.2.4.3. Sistema Robótico de Cumplimiento (RMFS)

Según Wang et al. [45] el RMFS es un novedoso sistema automatizado de almacenamiento y recuperación que incorpora estaciones de trabajo de recolección, robots móviles y estantes de almacenamiento móviles (pods). En este sistema, los contenedores son transportados por robots móviles, permitiendo que los recolectores se centren únicamente en su labor, mejorando la eficiencia y reduciendo la posibilidad de errores humanos.

La estructura del RMFS se divide en dos áreas principales: el área de recolección, que incluye estaciones de trabajo y estaciones de pods, y el área de almacenamiento, que consta de unidades de almacenamiento de pods.

Este sistema se organiza en módulos independientes, cada uno cuenta con una estación de trabajo, un recogedor, estaciones pod en la zona de recolección y varios pasillos independientes en la zona de almacenamiento. Los robots y las estaciones pod están asignados a pasillos específicos, y un selector es responsable de las transacciones de recuperación de pedidos en todo el módulo. Lo anterior muestra el por qué se considera un sistema extremadamente costoso, siendo esta su mayor desventaja.

Para finalizar, las ventajas del RMFS son:

- Evita bloqueos y puntos muertos del tráfico y facilita la identificación de la distribución de productos.
- Las estaciones de *pod* separan la operación de recolección de los recolectores del transporte robótico, lo que permite la operación paralela y mejora la eficiencia de la recolección.
- Un recolector solo es responsable de las tareas de recuperación de pedidos ocurridos en un módulo.

- Elimina el tiempo de inactividad al contar con robots de repuesto.
- Su diseño equilibra rendimiento y costos y tiene mayor capacidad de procesamiento de pedidos.

2.2.4.4. Grúas De Dos Pasillos (TPC-AS/RS)

Según Chen et al. [46] en el sistema TPC-AS/R, la entrada y salida de productos se realiza a través de un punto específico. Tiene dos grúas que operan a la vez en un pasillo central, donde se instalan estanterías de almacenamiento en ambos lados y cada rack tiene varios niveles. Además, está conformado por un punto E/S elevado al centro de las estanterías, con dos grúas idénticas que pueden detenerse y permitirse el paso una a la otra. Cabe mencionar, que cada grúa tiene una plataforma giratoria que recoge productos de ambos lados del estante y manejan una política de asignación dedicada que evita la interferencia y mejora la eficiencia en sistemas grandes con alta demanda de clientes.

Los tipos de grúas a manejar por el sistema son:

- No pasantes: Que se evitan mutuamente para acceder a sus áreas de trabajo.
- Grúas dobles no pasantes y no idénticas: Una es más grande y pueden pasarse con interferencia limitada.
- Grúas dobles idénticas: Deben detenerse y permitir el paso a la otra.

Por otro lado, la desventaja del sistema son tiempos de respuesta relativamente largos y la baja capacidad de rendimiento.

2.2.4.5. Carruseles

El carrusel consta de estantes en un riel circular cerrado, que facilita almacenar productos. Cuando se requiere un artículo, el sistema gira hasta el estante adecuado, esperando a que el recogedor lo tome antes de avanzar hacia el siguiente producto, ya que estos carruseles suelen ubicarse en el área de recolección. En este caso se hace enfoque en el carrusel vertical, que consta de estantes conectados por cadenas giratorias en un eje horizontal, cada uno con cajas para almacenar los productos.

Según Nicolas et al. [47], el sistema destaca por tener una actividad principal basado en el área de recolección de pedidos, lo que implica recuperar productos de su ubicación de almacenamiento para satisfacer los pedidos de los clientes. Cada pedido consta de varias líneas que representan una cantidad específica de un producto almacenado en un estante particular de un carrusel. Esta operación es fundamental en los almacenes, ya que equivalen al 55 % de los costos operativos en almacenes tradicionales y, aumenta la eficiencia operativa.

En el proceso de recolección cada lote de pedidos requiere que el recogedor reciba un número de contenedores igual al número de pedidos en ese lote, siendo cada contenedor asignado a un pedido único. Los productos de cada pedido se recogen de un estante específico en un carrusel determinado y se colocan en el contenedor correspondiente. Cabe señalar, que para la secuencia de recolección se comienza con el recogedor extrayendo las líneas de pedido del primer estante del primer carrusel, mientras los carruseles se desplazan para presentar el siguiente estante. Luego, el recogedor se mueve al siguiente carrusel y repite el proceso hasta que se hayan recuperado todos los productos del primer estante de todos los carruseles. Después, el recolector regresa al primer carrusel para recoger los productos del segundo estante, y así sucesivamente, hasta que se completen todas las líneas de pedido de todos los estantes y de todos los carruseles.

2.2.5. Almacenamiento más cercano

2.2.5.1. Multi-lanzadera

El sistema procesa las solicitudes en forma de ciclos de operación, donde cada uno implica un recorrido de la máquina S/R desde el punto E/S con los elementos de almacenamiento, visitando las ubicaciones de la estantería para almacenar o recuperar, y regresando al punto E/S nuevamente con los artículos recuperados.

Este AS/RS consta con pasillos de almacenamiento, cada uno atendido por una máquina S/R de múltiples lanzaderas y con un punto E/S ubicado en un extremo. Por otro lado, la máquina S/R de múltiples transportadores de lanzadera, puede transportar varios elementos a la vez, permitiendo múltiples operaciones eficientes. Además, el dispositivo S/R se mueve tanto vertical como horizontalmente simultáneamente. Cabe señalar que, si los elementos del mismo tipo existen en ambas colas, se prioriza el envío del elemento de almacenamiento para satisfacer directamente la solicitud de recuperación. Igualmente, se conoce el estado inicial de cada ubicación de los artículos específicos.

Aunque el sistema pueda almacenar artículos en cualquier ubicación como se menciona anteriormente en el almacenamiento aleatorio, es necesaria crear una planeación donde se minimiza el tiempo de viaje de la máquina S/R, pues se presenta la necesidad de conocer la duración de permanencia de las cargas unitarias que corresponden a las demandas del cliente, para así, maximizar la eficiencia del orden y selección. Por ello, el sistema también emplea el almacenamiento más cercano y la política de primeras en entrar, primeras en salir (PEPS). Todo lo anterior afirmado por Yang et al. [14].

2.2.5.2. Sistema de lanzadera con pasillo entre pasillos

Lienert et al. [39] afirma que los sistemas basados en vehículos autónomos (AVS/RS) almacenan pequeñas cargas unitarias para suministrar áreas de selección o producción.

Según Malmborg [64] los sistemas de lanzaderas se caracterizan por contar con elevadores para que un vehículo pueda operar en diferentes niveles (vehículos de nivel a nivel) de almacenamiento y recuperación dentro del mismo pasillo. Aquí, las unidades de almacenamiento se etiquetan con números de secuencia crecientes y al recibir una solicitud de recuperación, una grúa apiladora traslada las unidades desde un búfer entre el pasillo de almacenamiento y el bucle transportador donde esperan su turno. Sin embargo, si el búfer se llena, la capacidad de almacenamiento disminuye lo que afecta las secuencias de almacenamiento, ya que una secuencia debe esperar a que se libere otra antes de ingresar al bucle transportador, lo que puede generar retrasos y bloqueos si no se administra adecuadamente.

Cabe aclarar, que estos sistemas además de ofrecer mayor capacidad y escalabilidad también cuentan con dos etapas: La primera, los números de secuencia recuperados de un solo nivel de almacenamiento deben proporcionarse en orden ascendente en ese nivel de almacenamiento en el elevador, que suministra un punto de uso. Y segunda, el elevador mueve los números de secuencia hacia la ubicación entrada/salida para establecer una secuencia final. Allí, una computadora busca el número siguiente de secuencia para llevar el vehículo cargado al nivel entrada/salida, donde se entrega la unidad de almacenamiento. Se resalta que el sistema cuenta con tres elevadores y cada uno suministrando a un punto de uso, permitiendo tres secuencias independientes.

El rendimiento del sistema se ve impactado por una pérdida de capacidad de procesamiento relacionada directamente con el número de vehículos que operan. Para mitigar esto, es

recomendable tomar medidas adecuadas que consideren los costos y el espacio de forma individual. Por el contrario, si la recuperación en secuencia es un requisito permanente, se recomienda el uso de búfer de secuencia. Es importante tener en cuenta que la capacidad de procesamiento perdida por la recuperación en secuencia no solo depende del número de vehículos, sino también del diseño de los sistemas de almacenamiento.

2.2.5.3. Módulo de elevación vertical (VLM)

El Módulo de Elevación Vertical (VLM) es un tipo de AS/RS ampliamente utilizado, comprende un conjunto de bandejas de almacenamiento de inserción/extracción, en las cuales se almacenan los productos. Aquí, los recolectores deben recuperar los productos caminando por los pasillos hasta llegar a la ubicación donde se almacena el producto.

Según Nicolas et al. [40] afirma que un VLM se distingue por contar con:

- Definición de preparación de pedidos donde se recupera productos desde la ubicación de almacenamiento correspondiente para ejecutar la solicitud de los clientes.
- Representación del pedido donde un encargo del consumidor es un conjunto de líneas, y cada una corresponde a una cantidad requerida de un producto dado, almacenado en una bandeja específica del VLM correspondiente.
- Agrupamiento de pedidos en lotes, en el que cada uno consta de un subconjunto de pedidos, donde todas las líneas de un pedido deben colocarse en el mismo lote.
- Recogida de lotes con VLM, donde cada lote requiere un número de contenedores igual al número de pedidos incluidos en el lote. Aquí, es fundamental que cada pedido se coloque en un contenedor diferente.

- Recuperación de líneas de pedido de una bandeja VLM, ubicando el producto en el contenedor asociado con el pedido hasta visitar todos los VLM con productos a recoger.
- Finalización de la recogida: Los contenedores salen del área de recogida cuando se recogen todos los productos. Tan pronto como el recolector recibe nuevos contenedores asociados con un nuevo lote, nuevamente se repite el proceso hasta que se recolectan todos los lotes.

Como ventaja, un VLM ejerce la agrupación de productos de varios pedidos desde la misma bandeja cuando realiza el proceso de recuperación. Aquí, se destaca dos mecanismos: Fuera de línea, cuando todos los pedidos se conocen de antemano y, están todos disponibles para la agrupación. Y en línea, cuando solo algunos pedidos están disponibles desde el principio. Ambas técnicas generan ahorros de tiempo y costos.

2.2.5.4. Extremo de Pasillo (EOA)

Un EOA tiene por objetivo integrar la preparación de pedidos con AS/RS, en este sistema las estaciones de trabajo se instalan al final de los estantes. Aquí, el proceso de las cargas unitarias es recuperada por la grúa, y transportadas a estaciones de trabajo para la preparación de pedidos para luego ser devueltas al estante. Cabe señalar que las solicitudes de recuperación se convierten próximamente en solicitudes de almacenamiento, por lo cual, se maneja una cola de recuperación bajo la política de primeras en entrar son las primeras en salir (PEPS) en las que se asignan los artículos al espacio más cercano.

En particular, un EOA aplica en los entornos de recogida de pedidos, usualmente de los centros de distribución B2C (Empresa a consumidor). En cuanto a sus características de diseño, se distingue por contar con dos estaciones de recogida frente a estantes, considerar pallet recuperados transportados a un punto E/S, en el que el recogedor extrae los artículos de los pallets. Luego, los

pallets pasan a ser restablecidos por la grúa y si, se ha acabado el trabajo de recogida de la máquina S/R el recogedor puede dirigirse al próximo grupo de pallets, en caso contrario debe ir a la grúa. Todo lo anterior afirmado por Jiang et al. [41].

3. Conclusiones y recomendaciones

Al cruzar la información entre las características de diseño y las políticas de almacenamiento se concluye que:

Si se conoce la manera en la que la empresa maneja su inventario, es más fácil deducir su tipo de AS/RS. De manera que el gestor de almacenes puede dirigirse directamente a la política de almacenamiento que utiliza la organización y evaluar los AS/RS que funcionan para esta. Es decir, facilita la toma de decisiones.

Se señala que la implementación del AS/RS depende de las necesidades específicas de la empresa, pues se requiere seleccionar de manera asertiva el tipo de AS/RS que se utilizará en la compañía, ya que se debe satisfacer con todos los menesteres del cliente y responder a la inversión monetaria inicial.

Se puede decir que gracias sus características de diseño, el AS/RS más flexible y utilizado por las empresas es el SBS/RS, ya que acepta modificaciones en su funcionamiento mientras está en proceso de ejecución (como añadir número de lanzaderas y reordenar su ubicación), facilitando la respuesta a las variaciones de la demanda que se puedan presentar.

La política de almacenamiento conocida como la más cercana destaca por proporcionar mayor adaptabilidad y flexibilidad, ya que no posee un requerimiento exclusivo. Sin embargo, no se considera que exista un almacenamiento que responda solo a un tipo de AS/RS, ni tampoco se

encuentra un diseño físico destinado exclusivamente a un tipo de almacenamiento (a pesar de los AS/RS comparten características).

Es importante resaltar que este artículo solo toca el tema de los AS/RS centrados en las características de diseño, pero hay varios elementos atrás no abordados que se recomiendan ser objeto de estudio en futuras investigaciones como decisiones de secuenciación, loteo, etc... Asimismo, el interés inicial de este estudio se basaba en categorizar los tipos de AS/RS según los sectores productivos que lo emplean. Sin embargo, debido a los insuficientes estudios encontrados, se decidió centrarse solo en el sector logístico. Por ende, se evidencia que todavía es un ámbito con deficiencia de información en cuestiones de uso e implementación de AS/RS en otras industrias como: comercio electrónico, manufactura, cadena alimenticia y bibliotecaria; Por ello, se recomienda para futuras indagaciones su inspección.

Apéndices

- Apéndice A. Uso del AS/RS en el sector logístico.
- Apéndice B. Análisis bibliométrico.
- Apéndice C. Bitácora del estudio exploratorio.
- Apéndice D. Formato de revista.

Referencias

- [1] A. Nordeide y S. Rørtveit, “The Impact of Automated Storage and Retrieval Systems on Warehouse Operations”.
- [2] Jim Stirewalt, “The Big Confluence: Why Warehouse Automation Now”.
- [3] A. Swaraj, “Exploratory Research: Purpose And Process”. [En línea]. Disponible en: <https://www.epw.in/journal/2016/46/.../challenge-doing->
- [4] P. Žukauskas, J. Vveinhardt, y R. Andriukaitienė, “Exploratory Research”, en *Management Culture and Corporate Social Responsibility*, InTech, 2018. doi: 10.5772/intechopen.70631.
- [5] M. K. Lee y E. A. Elsayed, “Optimization of warehouse storage capacity under a dedicated storage policy”, *Int J Prod Res*, vol. 43, n° 9, pp. 1785–1805, may 2005, doi: 10.1080/13528160412331326496.
- [6] M. Schenone, G. Mangano, S. Grimaldi, y A. C. Cagliano, “Estimating travel times in dual shuttle AS/RSS.: A revised approach”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 10, n° 3, pp. 405–420, 2019, doi: 10.5267/j.ijiec.2018.12.002.
- [7] A. R. Gagliardi, C. Marshall, S. Huckson, R. James, y V. Moore, “Developing a checklist for guideline implementation planning: Review and synthesis of guideline development and implementation advice”, *Implementation Science*, vol. 10, n° 1, feb. 2015, doi: 10.1186/s13012-015-0205-5.
- [8] V. Nath Editor, “Lecture Notes in Electrical Engineering 403”, Circuits & Communication Systems. [En línea]. Disponible en: <http://www.springer.com/series/7818>
- [9] X. Man, F. Zheng, F. Chu, M. Liu, y Y. Xu, “Bi-objective optimization for a two-depot automated storage/retrieval system”, *Ann Oper Res*, vol. 296, n° 1–2, pp. 243–262, 2021, doi: 10.1007/s10479-019-03222-1.
- [10] L. Polten y S. Emde, “Multi-shuttle crane scheduling in automated storage and retrieval systems”, *Eur J Oper Res*, vol. 302, n° 3, pp. 892–908, 2022, doi: 10.1016/j.ejor.2022.01.043.
- [11] IEEE Technology and Engineering Management Society. Thailand Chapter, IEEE Technology and Engineering Management Society. Singapore Chapter, IEEE Technology and Engineering Management Society. Hong Kong Chapter, y Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE IEEM2018 : 2018 IEEE*

International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management : 16-19 Dec, Bangkok, Thailand.

- [12]W. Fandi, S. Kouloughli, y L. Ghomri, “Multi-shuttle AS/RS dimensions optimization using a genetic algorithm—case of the multi-aisle configuration”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, n° 1–2, pp. 1219–1236, may 2022, doi: 10.1007/s00170-022-08787-z.
- [13]X. Xu, G. Shen, Y. Yu, y W. Huang, “Travel time analysis for the double-deep dual-shuttle AS/RS”, *Int J Prod Res*, vol. 53, n° 3, pp. 757–773, feb. 2015, doi: 10.1080/00207543.2014.921351.
- [14]P. Yang, L. Miao, Z. Xue, y L. Qin, “An integrated optimization of location assignment and storage/retrieval scheduling in multi-shuttle automated storage/retrieval systems”, *J Intell Manuf*, vol. 26, n° 6, pp. 1145–1159, 2015, doi: 10.1007/s10845-013-0846-7.
- [15]J. Huh, M. jung Chae, J. Park, y K. Kim, “A case-based reasoning approach to fast optimization of travel routes for large-scale AS/RSs”, *J Intell Manuf*, vol. 30, n° 4, pp. 1765–1778, abr. 2019, doi: 10.1007/s10845-017-1349-8.
- [16]P. Yang, K. Yang, M. Qi, L. Miao, y B. Ye, “Designing the optimal multi-deep AS/RS storage rack under full turnover-based storage policy based on non-approximate speed model of S/R machine”, *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 104, pp. 113–130, 2017, doi: 10.1016/j.tre.2017.05.010.
- [17]W. Dong, M. Jin, Y. Wang, y P. Kelle, “Retrieval scheduling in crane-based 3D automated retrieval and storage systems with shuttles”, *Ann Oper Res*, vol. 302, n° 1, pp. 111–135, jul. 2021, doi: 10.1007/s10479-021-03967-8.
- [18]J. Song, M. Yang, y X. Zhou, “Scheduling optimization of Automated Storage and Retrieval System Based on Four-way Shuttles”, *2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2020*, pp. 524–529, 2020, doi: 10.1109/ICMA49215.2020.9233686.
- [19]X. Kou, G. Xu, y C. Yi, “Belt-conveyor based efficient parallel storage system design and travel time model analysis”, *Int J Prod Res*, vol. 56, n° 23, pp. 7142–7159, 2018, doi: 10.1080/00207543.2018.1436784.
- [20]A. Roozbeh Nia, H. Haleh, y A. Saghaei, “Dual command cycle dynamic sequencing method to consider GHG efficiency in unit-load multiple-rack automated storage and retrieval systems”, *Comput Ind Eng*, vol. 111, pp. 89–108, 2017, doi: 10.1016/j.cie.2017.07.007.

- [21]A. R. Nia, H. Haleh, y A. Saghaei, “Energy-conscious dynamic sequencing method for dual command cycle unit-load multiple-rack automated storage and retrieval systems”, *Scientia Iranica*, vol. 24, n° 6, pp. 3371–3393, 2017, doi: 10.24200/sci.2017.4395.
- [22]M. Schenone, G. Mangano, S. Grimaldi, y A. C. Cagliano, “An approach for computing AS/R systems travel times in a class-based storage configuration”, *Prod Manuf Res*, vol. 8, n° 1, pp. 273–290, ene. 2020, doi: 10.1080/21693277.2020.1781703.
- [23]V. Singbal y G. K. Adil, “Development of an open-source data-driven simulator for the unit-load multi-aisle automated storage and retrieval systems”, *Journal of Simulation*, vol. 18, n° 2, pp. 220–238, 2024, doi: 10.1080/17477778.2023.2202337.
- [24]J. P. Gagliardi, J. Renaud, y A. Ruiz, “Sequencing approaches for multiple-aisle automated storage and retrieval systems”, *Int J Prod Res*, vol. 53, n° 19, pp. 5873–5883, oct. 2015, doi: 10.1080/00207543.2015.1012600.
- [25]J. P. Gagliardi, J. Renaud, y A. Ruiz, “On sequencing policies for unit-load automated storage and retrieval systems”, *Int J Prod Res*, vol. 52, n° 4, pp. 1090–1099, feb. 2014, doi: 10.1080/00207543.2013.838331.
- [26]T. Lerher, M. Edl, y B. Rosi, “Energy efficiency model for the mini-load automated storage and retrieval systems”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 70, n° 1–4, pp. 97–115, ene. 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5253-x.
- [27]J. P. Gagliardi, J. Renaud, y A. Ruiz, “A simulation modeling framework for multiple-aisle automated storage and retrieval systems”, *J Intell Manuf*, vol. 25, n° 1, pp. 193–207, feb. 2014, doi: 10.1007/s10845-012-0686-x.
- [28]B. Yetkin Ekren, “Graph-based solution for performance evaluation of shuttle-based storage and retrieval system”, *Int J Prod Res*, vol. 55, n° 21, pp. 6516–6526, 2017, doi: 10.1080/00207543.2016.1203076.
- [29]Y. Ma y J. Wang, “Travel time analysis for shuttle-based storage and retrieval system with middle input/output location”, *2019 16th International Conference on Service Systems and Service Management, ICSSSM 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/ICSSSM.2019.8887622.
- [30]Y. Ha y J. Chae, “A decision model to determine the number of shuttles in a tier-to-tier SBS/RS”, *Int J Prod Res*, vol. 57, n° 4, pp. 963–984, 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1476787.

- [31]Y. Lin, Y. Wang, J. Zhu, y L. Wang, “A Model and a Task Scheduling Method for Double-Deep Tier-Captive SBS/RS with Alternative Elevator-Patterns”, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 146378–146391, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120418.
- [32]H. Li, J. Lyu, L. Zhen, y D. Zhuge, “A joint optimisation of multi-item order batching and retrieving problem for low-carbon shuttle-based storage and retrieval system”, *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 4, jul. 2022, doi: 10.1016/j.clscn.2022.100042.
- [33]N. Kosanić, G. Z. Milojević, y N. D. Zrnić, “A survey of literature on shuttle based storage and retrieval systems”, *FME Transactions*, vol. 46, n° 3, pp. 400–409, 2018, doi: 10.5937/fmet1803400K.
- [34]T. Kriehn, F. Schloz, K. H. Wehking, y M. Fittinghoff, “Impact of class-based storage, sequencing of retrieval requests and warehouse reorganisation on throughput of shuttle-based storage and retrieval systems”, *FME Transactions*, vol. 46, n° 3, pp. 320–329, 2018, doi: 10.5937/fmet1803320K.
- [35]X. Yan, Z. Zhang, Q. Liu, C. Lv, L. Zhang, y S. Li, “An NSABC algorithm for multi-aisle AS/RS scheduling optimization”, *Comput Ind Eng*, vol. 156, n° March, p. 107254, 2021, doi: 10.1016/j.cie.2021.107254.
- [36]M. A. Hamzaoui, T. Arbaoui, F. Yalaoui, y Z. Sari, “An exact optimization method based on dominance properties for the design of AS/RSs”, *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 146, feb. 2021, doi: 10.1016/j.tre.2020.102204.
- [37]Y. Wang, R. Zhang, H. Liu, X. Zhang, y Z. Liu, “Task scheduling model of double-deep multi-tier shuttle system”, *Processes*, vol. 7, n° 9, pp. 1–17, 2019, doi: 10.3390/pr7090604.
- [38]L. Ghomri y Z. Sari, “Mathematical modeling of the average retrieval time for flow-rack automated storage and retrieval systems”, *J Manuf Syst*, vol. 44, pp. 165–178, jul. 2017, doi: 10.1016/j.jmsy.2017.05.002.
- [39]T. Lienert y J. Fottner, “Routing-based Sequencing Applied to Shuttle Systems”, *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, vol. 2018-Novem, pp. 2949–2954, 2018, doi: 10.1109/ITSC.2018.8569330.
- [40]L. Nicolas, F. Yannick, y H. Ramzi, “Order batching in an automated warehouse with several vertical lift modules: Optimization and experiments with real data”, *Eur J Oper Res*, vol. 267, n° 3, pp. 958–976, 2018, doi: 10.1016/j.ejor.2017.12.037.

- [41]M. Jiang y P. Yang, “Retrieval scheduling for end-of-aisle multi-shuttle automated storage and retrieval systems”, *2017 4th International Conference on Industrial Engineering and Applications, ICIEA 2017*, pp. 300–304, 2017, doi: 10.1109/IEA.2017.7939226.
- [42]L. Baardman, K. J. Roodbergen, H. J. Carlo, y A. H. Schrotenboer, “A Special Case of the Multiple Traveling Salesmen Problem in End-of-Aisle Picking Systems”, *Transportation Science*, vol. 55, n° 5, pp. 1151–1169, 2021, doi: 10.1287/trsc.2021.1075.
- [43]S. Antomarioni, L. Lucantoni, F. E. Ciarapica, y M. Bevilacqua, “Data-driven decision support system for managing item allocation in an AS/RS: A framework development and a case study”, *Expert Syst Appl*, vol. 185, n° July, p. 115622, 2021, doi: 10.1016/j.eswa.2021.115622.
- [44]M. P. O. J. Gootzen, I. J. B. F. Adan, J. W. E. Heling, y B. Van Wijngaarden, “Task scheduling in a full roaming shuttle system”, *Proceedings - Winter Simulation Conference*, vol. 0, pp. 2844–2854, 2016, doi: 10.1109/WSC.2016.7822320.
- [45]W. Wang, Y. Wu, J. Zheng, y C. Chi, “A comprehensive framework for the design of modular robotic mobile fulfillment systems”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 13259–13269, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966403.
- [46]W. Chen, Y. Gong, y R. B. M. de Koster, “Performance estimation of a passing-crane automated storage and retrieval system”, *Int J Prod Res*, vol. 60, n° 4, pp. 1210–1230, 2022, doi: 10.1080/00207543.2020.1854886.
- [47]L. Nicolas, F. Yannick, y H. Ramzi, “Optimization of order batching in a picking system with Carousels”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, n° 1, pp. 1106–1113, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.392.
- [48]B. Lei, Z. Jiang, y H. Mu, “Integrated Optimization of Mixed Cargo Packing and Cargo Location Assignment in Automated Storage and Retrieval Systems”, *Discrete Dyn Nat Soc*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/9072847.
- [49]H. P. Hsu, C. N. Wang, y T. T. Dang, “Simulation-Based Optimization Approaches for Dealing with Dual-Command Crane Scheduling Problem in Unit-Load Double-Deep AS/RS Considering Energy Consumption”, *Mathematics*, vol. 10, n° 21, nov. 2022, doi: 10.3390/math10214018.

- [50]B. Salah, M. Alnahhal, y R. Ahmad, “Automated stacker cranes: A two-step storage reallocation process for enhanced service efficiency”, *Processes*, vol. 10, n° 1, ene. 2022, doi: 10.3390/pr10010002.
- [51]Q. Yan, J. Lu, H. Tang, Y. Zhan, X. Zhang, y Y. Li, “Travel time analysis and dimension optimisation design of double-ended compact storage system”, *Int J Prod Res*, vol. 61, n° 20, pp. 6718–6745, 2023, doi: 10.1080/00207543.2022.2136283.
- [52]X. Xu, Y. (Yale) Gong, X. Fan, G. Shen, y B. Zou, “Travel-time model of dual-command cycles in a 3D compact AS/RS with lower mid-point I/O dwell point policy”, *Int J Prod Res*, vol. 56, n° 4, pp. 1620–1641, feb. 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1361049.
- [53]M. Soyaslan, C. Kozkurt, y A. Fenercioglu, “A new truck based order picking model for automated storage and retrieval system (AS/RS)”.
- [54]T. Wauters, F. Villa, J. Christiaens, R. Alvarez-Valdes, y G. Vanden Berghe, “A decomposition approach to dual shuttle automated storage and retrieval systems”, *Comput Ind Eng*, vol. 101, pp. 325–337, nov. 2016, doi: 10.1016/j.cie.2016.09.013.
- [55]W. Luejai, “Automated storage and retrieval system using FIFO method via PLC-integrated human machine interface”, en *ECTI-CON 2021 - 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology: Smart Electrical System and Technology, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., may 2021, pp. 1002–1005. doi: 10.1109/ECTI-CON51831.2021.9454823.
- [56]R. Manzini, R. Accorsi, M. Gamberi, y S. Penazzi, “Modeling class-based storage assignment over life cycle picking patterns”, *Int J Prod Econ*, vol. 170, pp. 790–800, dic. 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2015.06.026.
- [57]V. Singbal y G. K. Adil, “Designing an automated storage/retrieval system with a single aisle-mobile crane under three new turnover based storage policies”, *Int J Comput Integr Manuf*, vol. 34, n° 2, pp. 212–226, 2021, doi: 10.1080/0951192X.2021.1872104.
- [58]F. Ramtin y J. A. Pazour, “Product allocation problem for an AS/RS with multiple in-the-aisle pick positions”, *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, vol. 47, n° 12, pp. 1379–1396, dic. 2015, doi: 10.1080/0740817X.2015.1027458.

- [59]Z. Chen, X. Li, y J. N. D. Gupta, “A bi-directional flow-rack automated storage and retrieval system for unit-load warehouses”, *Int J Prod Res*, vol. 53, n° 14, pp. 4176–4188, jul. 2015, doi: 10.1080/00207543.2014.980459.
- [60]Y. Wang, S. Mou, y Y. Wu, “Task scheduling for multi-tier shuttle warehousing systems”, *Int J Prod Res*, vol. 53, n° 19, pp. 5884–5895, oct. 2015, doi: 10.1080/00207543.2015.1012604.
- [61]N. Boysen y K. Stephan, “A survey on single crane scheduling in automated storage/retrieval systems”, *European Journal of Operational Research*, vol. 254, n° 3. Elsevier B.V., pp. 691–704, 1 de noviembre de 2016. doi: 10.1016/j.ejor.2016.04.008.
- [62]Y. Yu y M. B. M. De Koster, “Designing an optimal turnover-based storage rack for a 3D compact automated storage and retrieval system”, *Int J Prod Res*, vol. 47, n° 6, pp. 1551–1571, ene. 2009, doi: 10.1080/00207540701576346.
- [63]P. Yang, L. Miao, Z. Xue, y L. Qin, “Optimal storage rack design for a multi-deep compact AS/RS considering the acceleration/deceleration of the storage and retrieval machine”, *Int J Prod Res*, vol. 53, n° 3, pp. 929–943, feb. 2015, doi: 10.1080/00207543.2014.942441.
- [64]C. J. Malmberg, “Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems”, *Int J Prod Res*, vol. 40, n° 8, pp. 1807–1822, may 2002, doi: 10.1080/00207540110118668.