

Algoritmos metaheurísticos implementados en la optimización de los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AR/RS): Una revisión de literatura

Raul Andres Monsalve Tapias

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Industrial

Director

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

Dedicatoria

Le dedico este logro académico a mi madre Sandra Tapias y a mi padre Raul Monsalve quienes siempre me ha apoyado académicamente como personalmente, que me han ayudado a cumplir mis sueños y me han brindado dedicación y cariño en todo momento. A mi hermana Sara Monsalve que con sus palabras me ha apoyado y levantado en los momentos indicados. Y a mi pareja Leidy Jaramillo por su apoyo y amor que me brindo durante este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pag
Introducción	11
Cumplimiento de Objetivos	12
1. Planteamiento del Problema.....	13
2. Objetivos	15
2.1. Objetivo General.....	15
2.2. Objetivos Específicos.....	15
3. Revisión de Literatura.....	16
3.1. Análisis Bibliométrico	16
3.2. Base de Datos.....	16
3.3. Publicaciones por Año	19
3.4. Fuentes de Publicación	20
3.5. Conexiones Entre Autores	21
3.6. Palabras Clave.....	22
3.7. Principales Países.....	23
4. Descripción general de AS/RS.....	23
4.1. Síntesis Inicial de los Documentos Seleccionados	26
5. Marco de Referencia	28
5.1. Marco Antecedentes.....	28
5.2. Marco Teórico.....	30
5.2.1 Automated storage and retrieval system (AS/RS)	30
5.2.2. Políticas de Control.....	32

5.2.3. Metaheurísticas.....	33
6. Metodología.....	35
6.1. Etapa 1: Revisión de Literatura Gris.....	35
6.1.1. Tesauros, Palabras clave y Formula.....	36
6.1.2. Bitácora.....	36
6.2. Etapa 2: Definir Problema de Investigación.....	38
6.3. Etapa 3: Búsqueda y Extracción.....	39
6.3.1. Selección de las Bases de Datos.....	39
6.3.2. Revisión de Literatura en Sitios Especializados y Creación de la Ecuación de Búsqueda.....	39
6.3.3. Extracción de Información.....	40
6.4. Etapa 4: Recopilación de Información.....	40
6.5. Etapa 5: Obtención y Análisis de los Resultados.....	41
6.6. Etapa 6: Artículo de Carácter Publicable.....	41
7. Metaheurísticas en la optimización de los AS/RS.....	42
7.1. El Problema de la Programación (The Scheduling Problem).....	42
7.2. Problema de la secuenciación.....	55
7.3. Problema de la dosificación de pedidos.....	62
7.4. Problema de asignación de almacenamiento.....	64
7.5. Problema de diseño de AS/RS.....	70
7.6. Otros problemas de optimización.....	73
7.Discusión.....	76
8.Conclusiones.....	84
9.Recomendaciones.....	86

Referencias Bibliográficas 87

Lista de Tablas

	Pag.
Tabla 1. Tabla de cumplimientos de objetivos.	12
Tabla 2. Palabras clave	16
Tabla 3. Tabla de Metaheurísticas.	17
Tabla 4. Ecuación de Búsqueda.....	18
Tabla 5. Fuentes de publicación.....	20
Tabla 6. Principales tipos de AS/RS.....	31
Tabla 7. Etapas de la investigación.....	35
Tabla 8. Bitácora.....	37
Tabla 9. Resumen de los estudios clasificados que usaron el problema de programación.....	54
Tabla 10. Resumen de los estudios clasificados que usaron el problema de secuenciación.	61
Tabla 11. Resumen de los estudios clasificados que usaron el problema de la dosificación de pedidos.....	64
Tabla 12. Resumen de los estudios clasificados que usaron el problema de asignación de almacenamiento.	69
Tabla 13. Resumen de los estudios clasificados que usaron el problema de diseño de AS/RS....	73
Tabla 14. Resumen de los estudios clasificados en otros problemas de optimización.	76

Lista de Figuras

	Pag
Figura 1. Grafico del proceso de depuración	19
Figura 2. Publicaciones por Año.....	20
Figura 3. Conexión entre autores.	21
Figura 4. Palabras clave.	22
Figura 5. Principales países.....	23
Figura 6. Gráfico de tipos de AS/RS	25
Figura 7. Porcentaje de uso de las Metaheurísticas	77
Figura 8. Frecuencia de Metaheurísticas en AS/RS tradicional	78
Figura 9. Frecuencia de Metaheurísticas en AS/RS de múltiples lanzaderas.....	79
Figura 10. Frecuencia de Metaheurísticas en el problema de programación.....	80
Figura 11. Frecuencia de Metaheurísticas en el problema de secuenciación	81
Figura 12. Frecuencia de metaheurísticas en la minimización de tiempos de viaje	82

Lista de Apéndices

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

Apéndice A. Artículo de carácter publicable

Apéndice B. Bitácora

Resumen

Título: Algoritmos metaheurísticos implementados en la optimización de los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AR/RS): Una revisión de literatura.

Autor: Raul Andres Monsalve Tapias**

Palabras Clave: AS/RS, Metaheurísticas, Logística

Descripción: El uso de los sistemas Automatizados de almacenamiento y recuperación ha venido en aumento a través de los años, y es usado por múltiples empresas en entornos de producción y distribución. Si existe una desventaja de estos sistemas, es su alto costo de inversión, por lo tanto, es importante tener un buen conocimiento del tema y explorar las opciones que se acomoden más a las necesidades de la empresa, como el tipo de manejo de material, el espacio disponible, etc. Un punto importante de estos sistemas es la existencia de los problemas de optimización que como su nombre lo indica, tienen como objetivo mejorar la eficiencia ya sea de tiempos, costos, o energía. Para obtener soluciones a estos problemas que son clasificados como NP-Hard dentro de un margen de tiempo aceptable, se usan los algoritmos Metaheurísticos, que, aunque no lleguen a la solución perfecta, pueden obtener soluciones cercanas al óptimo con un tiempo computacional mucho menor. En este orden de ideas, este proyecto se enfoca en crear una clasificación que logre funcionar como guía para interesados en invertir en estos sistemas para sus empresas o para investigadores interesados en saber que modelos se han usado, y resultados obtenidos en artículos previos. En los resultados se presenta la clasificación mencionada anteriormente, junto con un análisis de frecuencias de las Metaheurísticas en tres variables encontradas en la lectura, el tipo de AS/RS, el problema de optimización y el objetivo de optimización, que indican las metaheurísticas más conveniente para cada variable según las lecturas revisada.

**Trabajo de grado

**Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento
M. Sc. Ingeniería Industrial

Abstract

Title: Metaheuristic algorithms implemented in optimizing automated storage and retrieval systems (AR/RS): A literature review.

Author(s): Raul Andres Monsalve Tapias^{††}

Key Words: AS/RS, Metaheuristics, Logistics

Description: The use of automated storage and retrieval systems has been increasing over the years, and is used by multiple companies in production and distribution environments. A disadvantage of these systems is their high investment cost, therefore, it is important to have a good knowledge of the subject and explore the options that best fit the needs of the company, such as material handling, available space, etc. An important point of these systems is the existence of optimization problems that as its name indicates, have as objective to improve the efficiency either of times, costs, or energy of the system, to obtain solutions to these problems that are classified as NP-Hard within a margin of acceptable time, for the operation the metaheuristics are used, that although they do not arrive at the perfect solution, they can obtain close solutions with a much shorter computational time. In this order of ideas, this project focuses on creating a classification that serves as a guide for those interested in investing in these systems for their companies or for researchers interested in knowing what models have been used, and the results obtained in previous articles. The results present the classification mentioned above, together with a frequency analysis of the Metaheuristics in three variables found, the type of AS/RS, the optimization problem, and the optimization objective, which indicate the most convenient metaheuristics for each variable according to the reviewed readings.

^{††}Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Edgar Eduardo Córdoba Sarmiento
M. Sc. Ingeniería Industrial

Introducción

Los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS-Automated storage and retrieval systems) son instalaciones de almacenamiento y transporte manejadas por computador para manipular materiales con gran volumen y capacidad de almacenamiento con velocidad y precisión, por esta razón son usados por compañías para manejar recursos de manera costo-efectiva (Manzini et al., 2006). El uso de las AS/RS tiene muchas ventajas sobre sistemas no automatizados, como ahorro en los costos de trabajadores, el espacio de la planta, incremento de la confianza y disminución del porcentaje de errores, siendo el costo de implementación una desventaja de estos sistemas (Roodbergen & Vis, 2009). Los sistemas cuentan con una amplia variedad de tipos y diseños que permite la adaptación a diferentes plantas, dependiendo también del espacio físico disponible, la tecnología necesaria, el material que se maneja y los costos asociados. Como se ha establecido anteriormente el objetivo de las AS/RS es optimizar los procesos de manejo de materiales ya sea a partir de costos, tiempos de operación y niveles de ocupación. Esta finalidad se mantiene aun después de la implementación, resolviendo problemas de optimización de alta complejidad a través de métodos exactos o haciendo uso de Algoritmos metaheurísticos para llegar a soluciones factibles que mejoren los procesos de almacenamiento, programación de inventarios, recuperación, asignación de espacios, etc.

Teniendo en cuenta el contexto dado, este proyecto propone una revisión de la literatura existente acerca de los algoritmos metaheurísticos implementados en los AS/RS, clasificándolos con base en el tipo de sistema y al problema de optimización que se está abarcando, para que funcione como recurso para las partes interesadas en estos sistemas ya sea profesional o académicamente en su campo.

Cumplimiento de Objetivos

A continuación, se presenta la tabla 1 de cumplimiento de objetivos, que expone cada objetivo propuesto para este proyecto en la sección 2, junto con la forma en que se resolvió y el numeral en donde se presenta.

Tabla 1.

Tabla de cumplimientos de objetivos.

Realizar una revisión preliminar de literatura gris para identificar palabras clave y términos relevantes asociados a la temática planteada.	Se identificaron, con la revisión preliminar las palabras clave que permitieron entender el contexto del proyecto, como se puede evidenciar en los numerales 3 y en el numeral 6.1.
Efectuar una revisión de literatura científica para mapear, describir y analizar los diferentes tipos de metaheurísticas implementadas en la optimización de los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS).	Se realizó una investigación literaria de los artículos seleccionados en el numeral 3, se realizó una bitácora mencionada en los numerales 4 y en el numeral 6 y se realizó un marco de referencia y teórico en el numeral 5 en donde se analizaron las Metaheurísticas que se encontraban en la literatura
Construir una clasificación de los diferentes tipos de metaheurísticas utilizadas como alternativa de solución en función del problema de optimización y el tipo de AR/RS seleccionado.	Para la construcción de la clasificación se tuvo en cuenta las metodologías mencionadas en la sección 6, y se realizó en función del problema de optimización, para después exponer el AS/RS, políticas de control, objetivos de decisión y las Metaheurísticas y los resultados que se obtuvieron, esto se puede evidenciar en la sección 7.
Construir un artículo de carácter publicable con los resultados de la investigación	Por último, se redactó y adaptó el documento a la estructura de un artículo de carácter publicable que compila la clasificación y la discusión, y se encuentra como el apéndice A

1. Planteamiento del Problema

Los AS/RS como su nombre lo indica es un conjunto de sistemas de máquinas que ingresa y/o recupera productos de un almacén de manera automática mediante lanzaderas, cintas de transporte, etc. Sus ventajas en comparación a otros sistemas son un mejor control de inventarios, reducción de costos de mano de obra y mayor eficiencia en el uso del espacio (Chen et al., 2010).

Los AS/RS se presentan en diferentes tipos, con diferentes combinaciones de máquinas. Un AS/RS típico se compone de una serie de pasillos, cada pasillo tiene una máquina de almacenamiento y recuperación (S/R) con la que se accede a una zona de Entrada y salida (I/O) y con la cual solo se puede manipular un material a la vez, Aparte del tradicional, existen varias alternativas de AS/RS como grúas con múltiples lanzaderas, grúas de doble lanzadera, sistema de final de pasillo, AS/RS miniload, con estanterías estacionarias dobles, estanterías móviles en carruseles o en carril (Roodbergen & Vis, 2009).

En las operaciones industriales una de las cuestiones más importantes es la eficiencia y optimización de los procesos, los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación no son extraños a esta necesidad, existen problemas comunes a través de los diferentes tipos con el objetivo de optimizar los procesos como el problema de la reasignación de almacenes con movimientos de intercambio, problema de la asignación de ubicaciones e intercalación, problema de programación de tareas, problema de programación de grúas, problema de secuenciación, problema de dosificación de pedidos, problema de planificación de trayectorias y reubicación de artículos. Estos problemas son denominados NP-hard, los cuales requieren una capacidad y tiempo computacional muy alto para hallar la solución óptima, por lo tanto, para resolver esta clase de problemas en un tiempo factible se usan los algoritmos metaheurísticos que llegan a una solución

satisfactoria que mejora el desempeño del sistema, la elección de las metaheurísticas resulta significativa al desempeño del sistema, ya que dependiendo del tipo de AS/RS y del problema de optimización puede ser conveniente optar por unas opciones en lugar de otras. A través de la historia de los AS/RS múltiples autores han propuesto soluciones con diferentes metaheurísticas para estos problemas, y actualmente existe poca información que clasifique estos sistemas con estas técnicas de optimización.

En este orden de ideas esta investigación pretende identificar y clasificar el uso de las metaheurísticas primero con base al problema de optimización, y después al tipo de AS/RS, teniendo en cuenta las asunciones del sistema que tuvo el autor. Presentando los resultados obtenidos encontrados en las bases de datos consultadas. Esto para lograr una clasificación organizada y facilitar a usuarios el uso de esta información. Esta investigación se considera importante, porque las conclusiones pueden ser usadas con fines académicos, ayudar a futuros investigadores definir qué metaheurísticas se han trabajado y cuales no en el tipo de AS/RS de interés, impulsando la investigación. También tiene uso empresarial, como posible guía para empresas que busquen optimizar sus sistemas.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Realizar una revisión de literatura para caracterizar los algoritmos metaheurísticos implementados en la optimización de los AS/RS soportando su uso teórico-práctico.

2.2. Objetivos Específicos

❖ Realizar una revisión preliminar de literatura gris para identificar palabras clave y términos relevantes asociados a la temática planteada.

❖ Efectuar una revisión de literatura científica para mapear, describir y analizar los diferentes tipos de metaheurísticas implementadas en la optimización de los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS).

❖ Construir una clasificación de los diferentes tipos de metaheurísticas utilizadas como alternativa de solución en función del problema de optimización y el tipo de AR/RS seleccionado.

❖ Construir un artículo de carácter publicable con los resultados de la investigación.

3. Revisión de Literatura

3.1. Análisis Bibliométrico

La revisión a la literatura se inició con los estudios “Integración de tecnologías aplicadas para el funcionamiento eficiente en los sistemas de almacenamiento y recuperación AS/RS” por Katherine & Cordobes (2012) y “Revisión de la Literatura Sobre el Problema de Programación de “Flow Shop” Híbrido con Maquinas Paralelas no Relacionadas” por Peña Tibaduiza et al. (2017). En estos estudios se identificó el proceso de optimización con metaheurísticas en los AS/RS, así como las palabras clave presentadas en la tabla a continuación. A partir de esto, se eligieron las bases de datos Scopus y Web of Science, reconocidas en el campo de la ingeniería y utilizadas en artículos investigados como los mencionados. Posteriormente, se formuló una ecuación de búsqueda para cada base de datos, lo que resultó en un total de 40 documentos que fueron sometidos al siguiente análisis.

Tabla 2.

Palabras clave

Acrónimo	Nombre completo
ASRS	Automated Storage and Retrieval Systems
AS/RS	Automated Storage and Retrieval Systems
AS-RS	Automated Storage and Retrieval Systems
	Heurísticas
	Metaheurísticas
	Problema de optimización
	NP-Hard

3.2. Base de Datos.

Inicialmente, se formuló la siguiente ecuación de búsqueda: (TITLE-ABS-KEY("Automated Storage and Retrieval System" OR "AS/RS" OR "ASRS" OR "AS-RS") AND TITLE-ABS-KEY("Metaheuristic*")). Esta búsqueda generó solo 8 resultados hasta la fecha en que se inició la investigación en 2023. A partir de esto, se observó que en varios proyectos no se

utilizaba la palabra "metaheurística" o "metaheuristic" en los filtros de búsqueda del título, resumen y palabras clave; en cambio, se aplicaban directamente las metaheurísticas. Por lo tanto, se decidió elaborar una lista de las más comunes e incluirlas en la fórmula una por una, para identificar las que se aplican en el campo en investigación. Para ello, se utilizó el documento "Overview of Metaheuristic Algorithms" de M. Almufti et al. (2023a), y se elaboró la Tabla 3, que contiene las metaheurísticas que se encontraron mencionadas y las que no. Además, se observó que al eliminar las siglas ASRS y AS-RS de la fórmula no se alteraba la cantidad de documentos obtenidos, por lo que se decidió descartarlas, finalmente obteniendo la ecuación de búsqueda de la tabla 4.

Tabla 3.

Tabla de Metaheurísticas.

Metaheurística	Mencionadas
Simulated Annealing – SA	SI
Tabú Search – TS	SI
Genetic Algorithm – GA	SI
Evolutionary Algorithm – EA	NO
Local Search - LS	SI
Variable neighborhood search - VNS	NO
Guided Local Search - GLS	NO
Clonal Selection Algorithm - CSA	NO
Harmony Search - HS	SI
Memetic Algorithm - MA	NO
Iterative Local Search - ILS	NO
Artificial Bee Colony - ABC	NO
Ant Colony Optimization - ACO	SI
Glowworm Swarm Optimization - GSO	NO
Shuffled Frog Leaping Algorithm - SFLA	NO
Invasive Weed Optimization – IWO	NO
Seeker Optimization Algorithm - SOA	NO
Imperialistic Competitive Algorithm - ICA	NO
Central Force Optimization - CFO	NO
Cultural Algorithm – CA	NO
Particle Swarm Optimization - PSO	SI

Tabla 4.

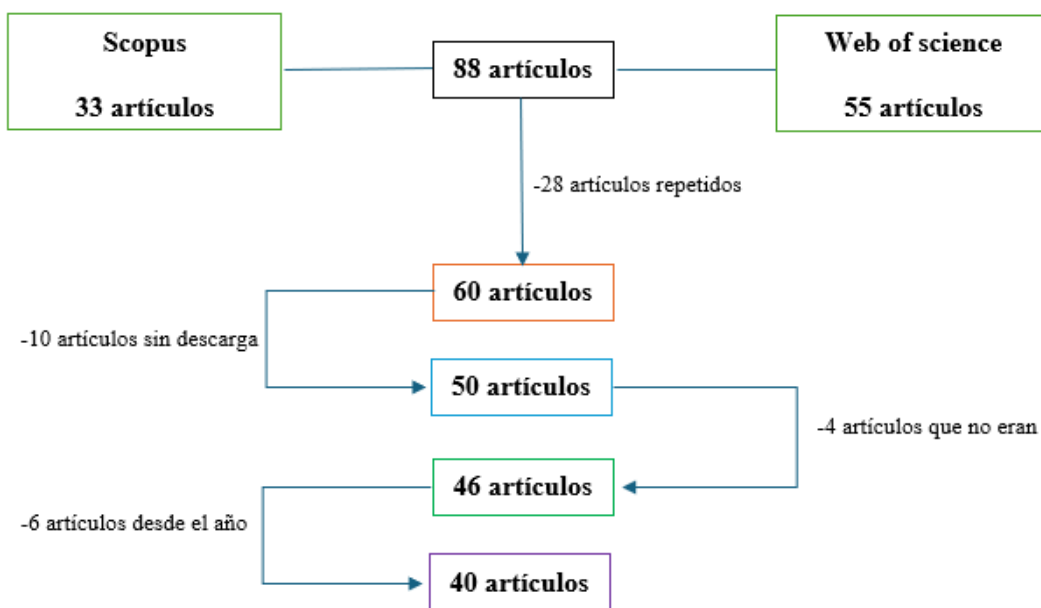
Ecuación de Búsqueda

Base de Datos	Ecuación de búsqueda	Resultados
Scopus	TITLE-ABS-KEY ("Automated Storage and Retrieval System" OR "AS/RS") AND TITLE-ABS-KEY ("Metaheuristic*" OR "Simulated Annealing" OR "SA" OR "Tabu Search" OR "TS" OR "Genetic Algorithm" OR "GA" OR "Particle Swarm Optimization" OR "PSO" OR "Local Search" OR "LS" OR "Harmony Search" OR "HS" OR "Ant Colony Optimization" OR "ACO") AND NOT TITLE-ABS-KEY ("as RS" OR "as rs")	33
Web of science	<p>“Automated Storage and Retrieval System” OR “AS/RS” NOT “as RS” OR “as rs” (Topic) and Simulated Annealing (Search within all fields) “Automated Storage and Retrieval System” OR “AS/RS” NOT “as RS” OR “as rs” (Topic) and Tabu Search (Search within all fields)</p> <p>“Automated Storage and Retrieval System” OR “AS/RS” NOT “as RS” OR “as rs” (Topic) and Genetic Algorithm (Search within all fields)</p> <p>“Automated Storage and Retrieval System” OR “AS/RS” NOT “as RS” OR “as rs” (Topic) and Particle Swarm Optimization (Search within all fields)</p> <p>“Automated Storage and Retrieval System” OR “AS/RS” NOT “as RS” OR “as rs” (Topic) and Local Search (Search within all fields)</p> <p>“Automated Storage and Retrieval System” OR “AS/RS” NOT “as RS” OR “as rs” (Topic) and Harmony Search (Search within all fields)</p> <p>“Automated Storage and Retrieval System” OR "AS/RS" NOT "as RS" OR "as rs" (Topic) and Ant Colony Optimization (Search within all fields) and 2010 or 2016 or 2015 or 2014 or 2013 or 2012 or 2011 or 2023 or 2022 or 2020 or 2021 or 2019 or 2018 or 2017 (Publication Years)</p>	55
Total		88

Posteriormente, se realizó un cruce entre ambas bases de datos, se descartaron los artículos duplicados, quedando 60 y se llevó a cabo una depuración en la que se eliminaron documentos con información no relevante al tema en cuestión. Además, K.J. Roodbergen, en su artículo de 2009 sobre AS/RS, menciona que “la investigación en el área de AS/RS debe moverse hacia algoritmos o heurísticas superiores que incluyan el dinamismo de los negocios actuales”. Por lo tanto, se decidió mantener artículos publicados entre 2010 y 2023, así como aquellos que no estaban disponibles para su descarga en línea. Finalmente, se retuvieron 40 artículos científicos. A continuación, se presenta en la figura 1 un gráfico del proceso de depuración.

Figura 1.

Grafico del proceso de depuración



3.3. Publicaciones por Año

Se tomó la decisión de incluir documentos desde el año 2010 hasta el presente año. En la Figura 1, se observa un crecimiento de publicaciones por año desde el 2017, reflejando mayor

interés por la optimización de las AS/RS en los últimos años, en el 2022 ocurre un pico de publicaciones y en el 2023 bajan un poco, aun así, se observa una tendencia positiva a lo largo del tiempo.

Figura 2.

Publicaciones por Año



3.4. Fuentes de Publicación

Tabla 5.

Fuentes de publicación

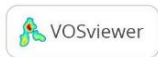
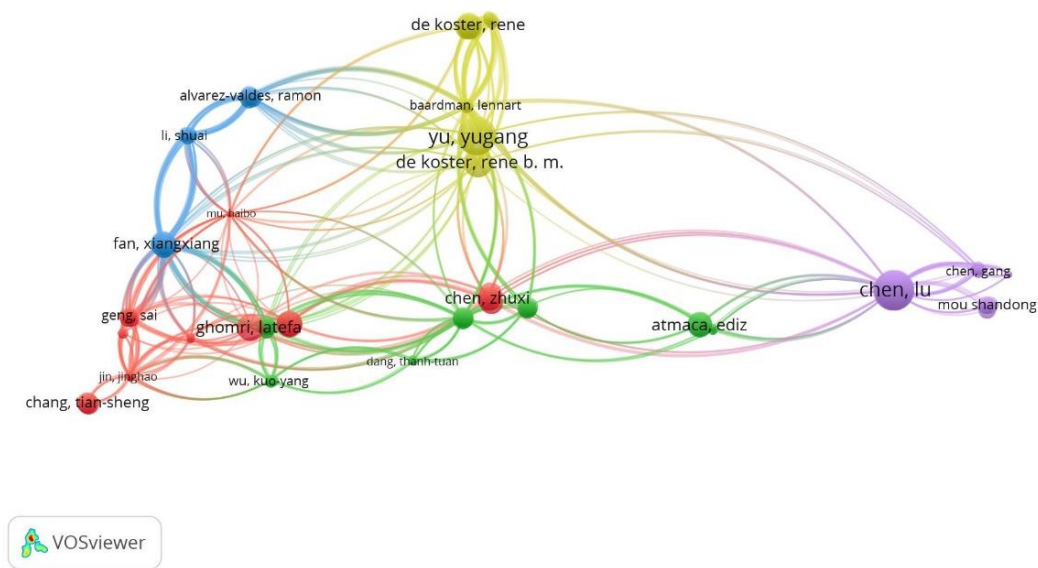
Fuente	Numero de Documentos
<i>MDPI</i>	5
<i>ELSEVIER</i>	13
<i>SPRINGER</i>	12
<i>HINDAWI</i>	3
<i>TAYLOR AND FRANCIS LTD</i>	3
<i>TUT PRESS</i>	1
<i>WILEY</i>	1
<i>VILNIUS</i>	1
<i>SHARIF UNIV</i>	1
TOTAL	40

Se hace una revisión a las Bases de datos y editoriales donde se publicaron los artículos, cabe resaltar Elsevier y Springer como las editoriales con más documentos referentes al tema con 13 publicaciones y 12 publicaciones respectivamente.

3.5. Conexiones Entre Autores

Figura 3.

Conexión entre autores.



Nota: Obtenido de VOSviewer

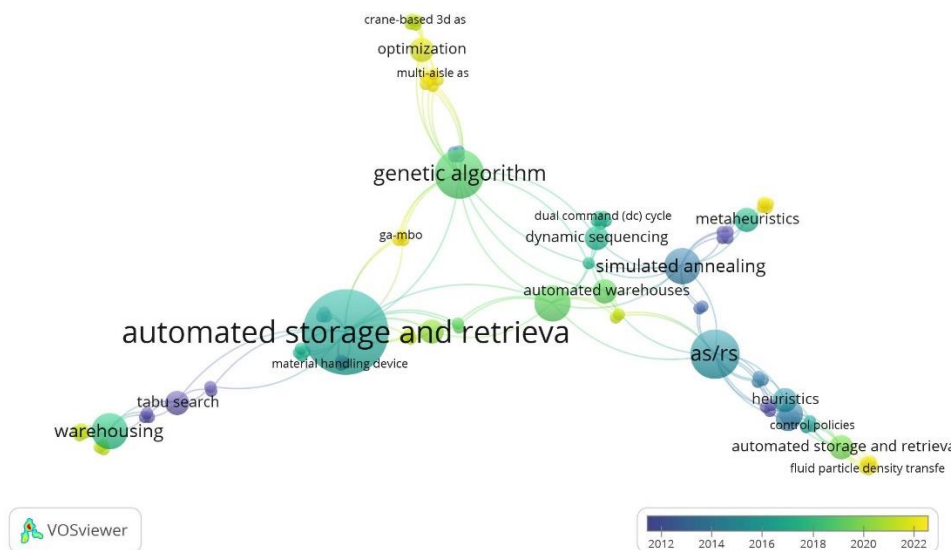
En la figura 2 podemos evidenciar la conexión entre citaciones de los autores seleccionados, podemos ver que entre los más citados tenemos a Lin J., Pan J., Shih P., & Wu M. que trabajaron en el mismo artículo y cuentan con 88 citas, seguido tenemos a Wang Y. con 61 citas, Miao I. & Yang P. con 58 citas y finalmente tenemos a Zhong R.Y. con 56 citas.

3.6. Palabras Clave

En la figura 3 se muestra la conexión entre las palabras clave utilizadas por los autores. Es evidente que las palabras “Automated Storage and Retrieval Systems”, “AS/RS”, “Warehousing”, “Genetic Algorithm”, “Simulated Annealing”, “Optimization” y “Metaheuristics” son las que obtuvieron el mayor número de ocurrencias en los artículos. Esto se debe a que los AS/RS están presentes en el ámbito de los “warehousing”, que forman parte de la cadena de suministro. La “optimization” es el objetivo que se busca alcanzar en los sistemas a través de los problemas de optimización y los objetivos de decisión. Por otro lado, “Genetic Algorithm” y “Simulated Annealing” son metaheurísticas utilizadas para lograr la optimización. De aquí se puede notar que los autores tienden a no incluir la palabra “Metaheuristics”, lo que se atribuye a una mayor preferencia por especificar el modelo aplicado.

Figura 4.

Palabras clave.



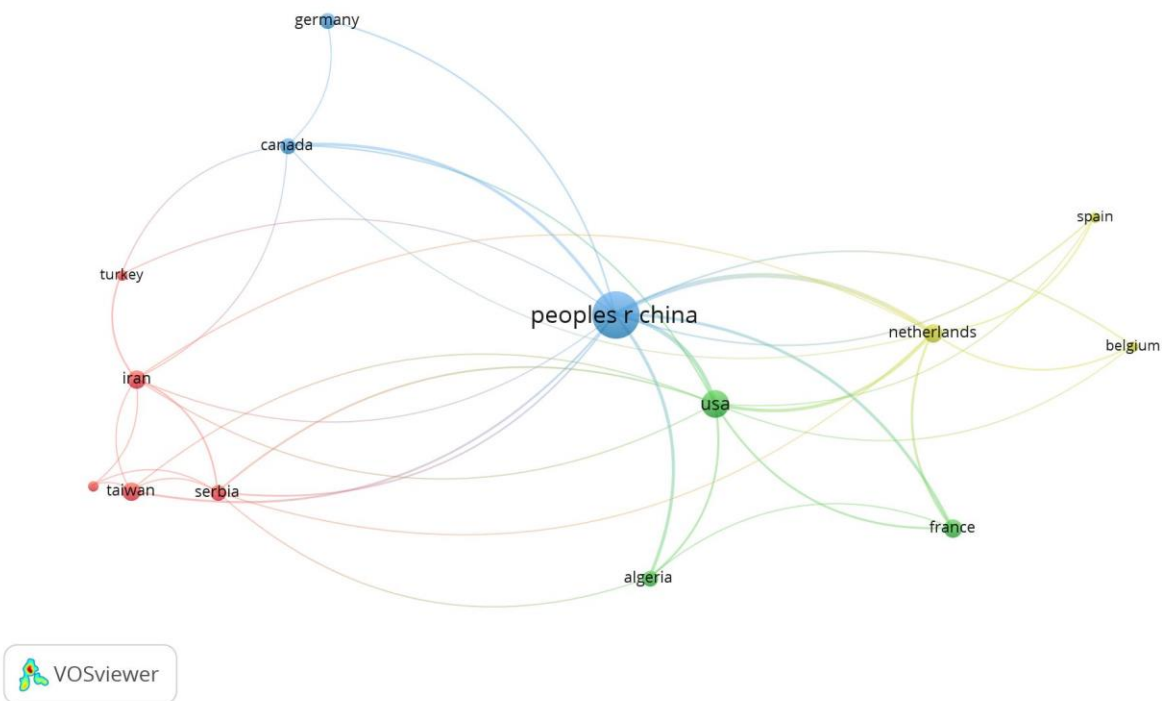
Nota: Obtenido de VOSviewer

3.7. Principales Países

En la figura 4 podemos ver los países más citados, claramente cabe destacar china como el país con 294 citaciones, demostrando ser el país con mayor investigación e interés en el tema del proyecto y las AS/RS en general, además cabe destacar los estados unidos con 83 citaciones, Países Bajos y Canadá con 82 citaciones, así como, Alemania y Taiwán.

Figura 5.

Principales países.



Nota: Obtenido de VOSviewer

4. Descripción general de AS/RS

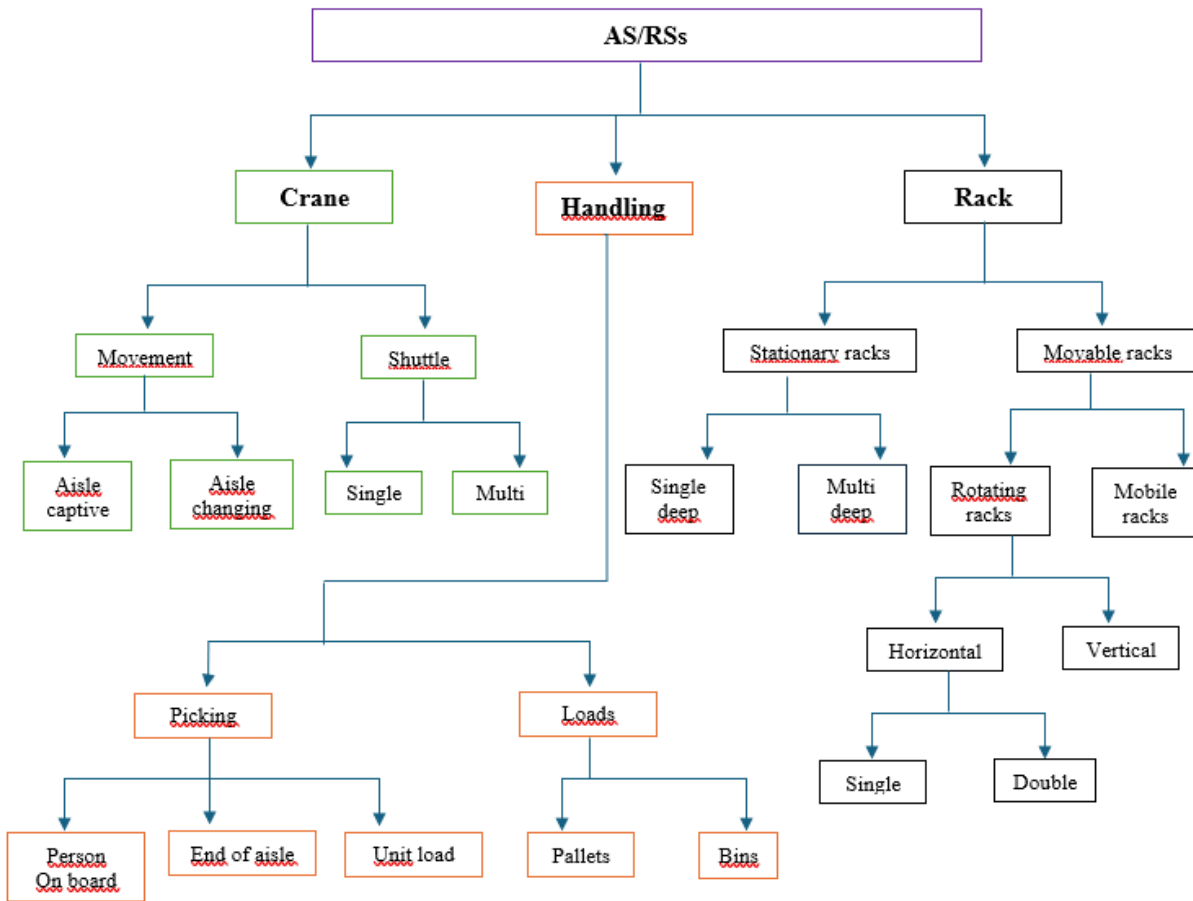
En los últimos años se ha presentado un incremento en el interés por los AS/RS esto debido a las anteriormente mencionadas ventajas que incluyen la disminución de errores, reducción de

costos, tiempos de movimiento de material eficientes, asignación y utilización óptima del espacio (Figueiredo et al., 2012), sin embargo estos sistemas deben ser eficientes si se quiere justificar la gran inversión que requieren, ya que los AS/RS requieren realizar un gran número de cargas diarias, es necesario planificar y ejecutar con precisión los procedimientos.

Un sistema típico de AS/RS usualmente llamado unit-load cuenta con estanterías, grúas y una serie de pasillos de almacenamiento, cada uno de los cuales dispone de una máquina de almacenamiento y recuperación (S/R) y una estación de entrada y salida (I/O) a la que se accede con el S/R y el sistema de manipulación externo. El funcionamiento de un AS/RS puede describirse en función de las decisiones operativas implicadas en la llegada de artículos, el sistema asigna una ubicación al artículo que se va a almacenar. Luego, el sistema determina la secuencia de operaciones del S/R para realizar los movimientos con el fin de optimizar el recorrido total, lo cual se denomina política de intercalación. Por lo tanto, las decisiones operativas del AS/RS de carga unitaria son en su mayoría la asignación en los almacenes y la política de intercalación (Chen et al., 2010). Existen diferentes formas de alterar la configuración del sistema típico, alterando partes de sus principales componentes en las grúas, estanterías y manera de manejar el material. A continuación, se presenta un gráfico adaptado de Roodbergen & Vis (2009). En el que se muestra opciones de configuración de sistemas de AS/RS.

Figura 6.

Gráfico de tipos de AS/RS



Nota: adaptado de K.J. Roodbergen (2009).

Otro concepto importante encontrado en la literatura son las políticas de asignación, se puede diferenciar en dos grandes clases: políticas de asignación de almacén, en las cuales la selección de carga entrante está sometida a restricciones, y las reglas de selección de ubicaciones abierta, que se presenta cuando la política no hace una selección única. A partir de estas, las reglas se diferencian por el objetivo que abordan, encontramos política de almacenamiento basada en clases, política de almacenamiento basada en rotación, almacenamiento aleatorio, duración de la

estancia de almacenamiento, almacenamiento dedicado, asignación de nivel de servicio y política de almacenamiento correlacionado (Manzini et al., 2006).

En línea con este concepto los AS/RS cuentan con políticas de control que cumplen la función de determinar las acciones que realizan los AS/RS, este conjunto coherente de políticas administra el sistema y cada una tiene un conjunto de actividades específico, entre las políticas de control existe el dwell-point o política de punto de permanencia, minimiza el tiempo previsto de desplazamiento, política de asignación de almacenamiento, las mencionadas en el párrafo anterior, el batching policy o política de lotes, load shuffling policy o política de carga aleatoria y el sequencing policy o política de secuenciación (Vasili et al., 2012).

Existe una aspiración a maximizar la eficiencia de los sistemas de manipulación de materiales, en esta encontramos los problemas de optimización los cuales buscan el punto en el que una determinada función sea mínima o máxima, usualmente, este punto debe cumplir algunas limitaciones que se encuentran en la realidad para lograr el objetivo (Rajković et al., 2019), un ejemplo de la importancia de estos es determinar la secuencia del S/R con el objetivo de minimizar el tiempo de desplazamiento que es una parte fundamental en la eficiencia del sistema (Man et al., 2021), en este orden de ideas en el contexto de los AS/RS estos problemas son considerados NP-Hard. Que debido a su dificultad resulta conveniente el uso de las metaheurísticas para llegar a una solución satisfactoria que puede ser calculada en un intervalo de tiempo y una capacidad computacional razonable.

4.1. Síntesis Inicial de los Documentos Seleccionados

Con la revisión preliminar de literatura se identifican elementos clave correspondientes al tema de la investigación, en este caso, el tipo de AS/RS, políticas de control que se le están aplicando, problema de optimización y finalmente las metaheurísticas sean puras o híbridas que se

usaron. A partir de estos elementos base se construye una bitácora ilustrada en la tabla 8, y se realiza un análisis a los documentos seleccionados anteriormente, esperando encontrar al menos tres de los cuatro componentes en cada documento.

Para los artículos elegidos, se optó por asignarles una codificación con la siguiente estructura:

$$\text{Codificación} = \text{Año} + \text{Tipo de AS/RS} + \text{Metaheurística} + \text{Problema}$$

Con el objetivo de facilitar la búsqueda de documentos específicos, e identificar los componentes importantes para los objetivos del proyecto antes de ingresar a los documentos directamente. Esto, a su vez, genera una clasificación y organización necesaria para los siguientes pasos.

En primer lugar, se encontró que el tipo de AS/RS más utilizado en los documentos es el AS/RS Unit load o de carga única, que como su nombre lo indica solo tiene capacidad de una carga en la grúa y los multi-shuttle o de carga múltiple, que se caracteriza por llevar más de una carga a la vez. (Kazemi et al., 2019). Cabe recalcar que se encontraron otros tipos como miniload, múltiples lanzaderas, de doble profundidad y con elevadores.

Respecto a las políticas de control se encontró que la mayoría de las menciones pertenecía a las políticas de secuenciación las cuales son usadas para que los recorridos minimicen el tiempo total de todos los pedidos o los incumplimientos en los plazos de entrega (Vasili et al., 2012).

Continuamos con los problemas de optimización en donde encontramos el problema de asignación puro en donde se busca minimizar la distancia, problema de programación de Entrada/salida (*I/O*), problema de secuenciación más problemas de asignación combinados como asignación con programación del almacenamiento/recuperación, en donde se busca minimizar el tiempo de viaje, asignación con optimización integrada del embalaje, asignación con secuenciación, y asignación de puntos *I/O* con programación de solicitudes de Almacenamiento y

recuperación (*S/R*) también cabe resaltar el problema del hybrid flowshop o taller de flujo híbrido, los cuales son considerados NP-Hard, es decir, un problema computacionalmente complejo. Esto se debe a que, por ejemplo, si se desea obtener la secuencia óptima para almacenar y recoger cajas en un inventario de 100 espacios, las posibilidades de resultados son muy altas. Si ese número de espacios aumenta a 110, las posibilidades crecen exponencialmente, convirtiendo el problema en uno computacionalmente ineficiente. Entonces, entran en juego las metaheurísticas, que logran proporcionar soluciones cercanas a las óptimas sin sacrificar la eficiencia computacional.

5. Marco de Referencia

5.1. Marco Antecedentes

Se realiza una revisión a trabajos de grado y artículos nacionales e internacionales, referentes a los temas relevantes de esta investigación, con el fin de explorar conocimiento desarrollado por otros autores.

Inicialmente, se encontró el trabajo “Integración de Tecnologías Aplicadas para el Funcionamiento Eficiente en los Sistemas de Almacenamiento y Recuperación AS/RS”. Por estudiantes de la Universidad Industrial de Santander, en el que Katherine & Cordobes (2012) presenta un estado del arte en sistemas logísticos de almacenamiento, que se realizó con el fin de aportar información para el diseño de un sistema aplicable a entornos con limitaciones, adaptable a los factores que interactúan con las organizaciones, para brindar beneficios a la demanda continua y equilibrada en los procesos de producción, almacenamiento y logística. El trabajo inicia describiendo conceptos generales referentes a los AS/RS como son carruseles, miniload, módulos de evaluación vertical, etc. Continúa con un marco teórico explicando los sistemas de almacenamiento convencionales, los AS/RS y las ventajas que traen. Finalmente concluye con información relevante a la aplicabilidad de los sistemas.

A continuación, se revisa el trabajo de investigación “Optimización de un Sistema Automatizado de Almacenamiento y Recuperación de Doble Plataforma desde la Perspectiva del Costo y Tiempo de Operación” para optar al título de magister en ingeniería industrial por Córdoba (2023). Presenta una investigación que propone estudiar un AS/RS de doble plataforma a través de un modelo matemático, evaluando políticas de control que favorezcan la toma de decisiones a partir del desempeño del sistema. Realizo una revisión literaria, formulo un modelo para la toma de decisiones en AS/RS, con parámetros de entrada, criterios de asignación, y supuestos, con el objetivo es plantear un modelo matemático para minimizar el tiempo de viaje de la grúa en los ciclos de secuenciación.

Por otro lado, se encuentra el siguiente trabajo de grado “Método Metaheurístico de Reasignación de Productos en un Centro de Distribución de Autopartes” para optar al título de magister en logística integral en la Universidad Militar Nueva Granada en Bogotá, Colombia, por Peñuela (2018). En el que se busca diseñar un método con metaheurísticas factible en la industria automotriz colombiana que logre optimizar los procesos de reasignación de productos con base en su correlación, en el trabajo explica la cadena de suministro, los sistemas AS/RS, y las metaheurísticas, después durante el desarrollo del proyecto, utiliza datos de una compañía colombiana del sector para definir una heurística combinatoria para definir la función *Quality* máxima, y finalmente obtiene como resultado una mejora del 17,55% con respecto a la distribución que está usando la empresa en la actualidad.

Finalmente, en este artículo realizado en la universidad KU Leuven en Bélgica llamado “A Decomposition Approach to Dual Shuttle Automated Storage and Retrieval Systems” por Wauters et al. (2016). Se plantean enfoques exactos y metaheurísticos para programar un sistema miniload de doble lanzadera, se aborda el problema de asignación de ubicaciones y después el problema de

secuenciación con el objetivo de minimizar el tiempo de espera ponderado total. Se creó un modelo heurístico como una secuencia de pasos, donde cada paso tiene una referencia a su predecesor y sucesor, en cada paso se obtiene una estructura de datos adicional que contiene información sobre el estado de la lanzadera, además se incluyó una búsqueda local para mejorar los resultados del proceso de construcción y en conclusión se obtuvo que esta metaheurística produce muy buenas soluciones en tiempo de cálculo más cortos, además de que muestra que el porcentaje de desviación estándar con respecto a la mejor solución obtenida es bastante bajo.

5.2. Marco Teórico

5.2.1 Automated storage and retrieval system (AS/RS)

Los procesos logísticos resultan muy importantes para la eficiencia de los almacenes, entre estos el almacenamiento y recuperación de material resulta muy interesante como punto focal para mejorar esta eficiencia, A través de los años se han ideado maneras de progresar y en la actualidad ha venido en aumento la tendencia en el interés por los AS/RS las cuales autores han definido de diferentes formas, por lo tanto, se expone un conjunto de las definiciones más pertinentes encontradas en la literatura.

Un AS/RS puede definirse como un sistema de almacenamiento totalmente automatizado, donde las piezas son accesibles para el picker a través de una o varias estanterías, las cuales se manipulan mediante grúas. La implementación de estos sistemas ha experimentado un considerable aumento en las últimas décadas, debido a las ventajas que ofrecen sobre los métodos tradicionales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los beneficios asociados dependen del diseño y las políticas de control, los cuales influirán directamente en su rendimiento (Z. Yang et al., 2019).

Así mismo, un AS/RS puede ser definido como una tecnología de la información que se basa en the internet of things (IoT, siglas en inglés, que describe dispositivos con sensores, capacidad de procesamiento, software y otras tecnologías que se conectan e intercambian datos con otros dispositivos), para almacenar y recuperar materiales sin intervención humana, para esto hace uso principalmente de estanterías, grúas, puntos de entrada/salida y cintas transportadoras. (Lu et al., 2022). Además de esto los AS/RS realizan sus movimientos precisión, exactitud y velocidad con una tasa baja de errores (Hu & Chang, 2010).

Ahora según Azzi et al. (2011) Un AS/RS es un sistema en el que una maquina realiza manipulación de materiales en rutas fijas llamadas pasillos dentro de estantes de almacenamiento y son usados ampliamente desde logística de fabricación hasta logística de almacenamiento. Finalmente, los AS/RS se han convertido en herramientas fundamentales en la industria logística en comparación con los métodos tradicionales. Estos sistemas mejoran significativamente la rotación y la eficiencia en la preparación de pedidos, lo cual es fundamental para el éxito del comercio electrónico moderno. Además, el desarrollo y la optimización de la programación tienen un impacto considerable en la eficiencia global del sistema (Yan et al., 2021).

Otro ámbito de los AS/RS que es importante identificar son los tipos de AS/RS, anteriormente en la sección 2, se expuso la gráfica de las posibles configuraciones de AS/RS por Roodbergen & Vis (2009), a continuación, se presenta los tipos principales de AS/RS según Vasili et al. (2012):

Tabla 6.

Principales tipos de AS/RS.

Tipos de AS/RS	Definición
----------------	------------

Carga unitaria (Unit-Load)	Sistema diseñado para manejar cargas unitarias almacenadas en pallets u otros contenedores estándar. Utiliza grúas apiladoras automatizadas para manipular las cargas
Carriles profundos (Deep-Lane)	Este sistema es de alta densidad y adecuado para almacenar grandes cantidades de productos, pero con un número relativamente bajo de productos diferentes. Permite almacenar las cargas en profundidades mayores que dos cargas en ambos lados del pasillo.
Miniload	Funciona como el sistema de carga única solo que es de menor tamaño y se utiliza para manejar cargas pequeñas, como partes individuales o suministros, en contenedores estándar pequeños o cajones.
Hombre a bordo (Man on board)	Es un sistema para recuperar elementos individuales del almacenamiento, donde un operador humano realiza la recogida del material viajando en el carro de la grúa apiladora.
Sistema de recuperación automática de artículos	Están diseñados para recuperar artículos individuales o cajas de productos del sistema, almacenados en carriles en lugar de contenedores o cajones
Módulos de almacenamiento de elevación vertical (VLSM, siglas en ingles)	También conocidos como sistemas de almacenamiento/recuperación automatizados de elevación vertical (VL-AS/RS) utilizan un pasillo vertical en lugar de horizontal. Permiten un gran inventario mientras ahorran espacio en el suelo de la fábrica.

5.2.2. Políticas de Control

Las políticas de control han sido áreas de investigación clave en las últimas décadas, y tienen gran impacto en el rendimiento. Según Vasili et al. (2012) son métodos que se usan para determinar las acciones realizadas por el sistema. Normalmente, la operación de un AS/RS esta administrada por un conjunto coherente de estas, cada una encargada de un subconjunto específico de actividades. Ahora bien Estas políticas incluyen, la política de punto de espera (Dwell-point), que determina donde espera una grúa inactiva con el objetivo de minimizar el tiempo esperado para viajar al próximo pedido, Política de asignación de almacenamiento, define qué productos se asignan a qué ubicaciones, Estrategia de reorganización de carga (Load-Shuffling), Se utiliza para reorganizar las cargas durante los periodos de inactividad de la grúa para minimizar el tiempo de respuesta de recuperación, Las reglas de secuenciación, Se utilizan para planificar las rutas de las

grúas de manera que se minimice el tiempo total de manejo de todos los pedidos o se minimicen las violaciones de los plazos de entrega, la selección de un método de secuenciación adecuado es muy significativo en casos que involucren múltiples dispositivos de S/R debido a la interacción entre varias tareas (Z. Yang et al., 2019) y la política de agrupamiento (Batching), que considera como combinar diferentes pedidos de clientes en una sola ruta de la grúa, especialmente aplicable a sistemas de AS/RS con operador humano a bordo.

5.2.3. *Metaheurísticas.*

Las Metaheurísticas son algoritmos que se inspiran en fenómenos naturales, y se utilizan para encontrar una solución cercana a la óptima explorando un amplio espacio de búsqueda, estos algoritmos se han utilizado ampliamente en varios campos como la ingeniería, las finanzas y la informática. Una ventaja de estos algoritmos es que no requieren un punto de inicio inicial para el problema de optimización, siendo buenos para problemas sin condiciones iniciales conocidas, aun así, se debe tener en cuenta que no siempre encontrarán el óptimo global debido a su complejidad, por lo tanto, el uso de las metaheurísticas debe hacerse con precaución y un entendimiento profundo del problema (M. Almufti et al., 2023b). Las metaheurísticas están divididas en basadas en evolución, basadas en el comportamiento humano, basadas en la física y basadas en enjambres. A continuación, se definen las metaheurísticas encontradas en la revisión de la bitácora:

❖ Algoritmo genético (GA): Inspirados en la genética, comienzan generando aleatoriamente una población inicial de soluciones y luego se evolucionan aplicando operadores de cruce y mutación, simulando el proceso de selección natural, donde los individuos con mayor aptitud sobreviven y se transmiten sus características a la siguiente generación. La estructura del algoritmo es primero generar una población inicial, evaluación de esta población, selección de individuos para ser

padres, proceso de cruce y mutación, reemplazo de la población y condición de terminación, que hasta que no se cumpla se repiten los pasos.

❖ Algoritmo de búsqueda tabú (TS): Inspirado en el concepto de memoria en la toma de decisiones humanas, genera aleatoriamente una solución inicial y luego busca en el vecindario aplicando operadores de intercambio o inversión. Utiliza una lista tabú para evitar volver a visitar soluciones ya visitadas.

❖ Algoritmo de recocido simulado (SA): Inspirado en el proceso de recocido en metalurgia, comienza generando aleatoriamente una solución inicial y luego reduce gradualmente la temperatura del sistema. A medida que la temperatura disminuye, el algoritmo empieza a aceptar soluciones peores para escapar de óptimos locales.

❖ Algoritmo por colonia de hormigas (ACO): Inspirado en el comportamiento de las hormigas para encontrar el camino más corto a la fuente de alimento, comienza generando aleatoriamente un conjunto inicial de senderos de feromonas, que representan la calidad de la solución, van siguiendo las feromonas basándose en la calidad de las soluciones que se vayan encontrando en el camino.

❖ Optimización de aves migratorias (MBO): Metaheurística inspirada en la naturaleza y basada en la formación de vuelo en V de las aves migratorias, comienza con una serie de soluciones iniciales que corresponden a la formación V, iniciando por la primera solución (que corresponde al pájaro líder), y avanzando en las líneas hacia las colas.

❖ Ordenación no dominante algoritmo genético II (NSGA II): Se aplica ampliamente para resolver problemas multiobjetivo. Primero se genera individuos iniciales aleatoriamente (soluciones factibles), luego, todos los individuos se ordenan teniendo en cuenta la regla de no dominación.

Cada generación, los descendientes se generan mediante operadores de algoritmo genético que incluye cruce y mutación y finalmente se realiza el proceso de recombinación para obtener soluciones de Pareto.

6. Metodología

A continuación, Se muestra una tabla donde se establecen seis etapas que se adaptaron de la metodología sistemática de Moher et al. (2009), para la consecución del proyecto siguiendo los objetivos planteados.

Tabla 7.

Etapas de la investigación.

ETAPA	DESCRIPCIÓN
Etapa 1	Revisión de literatura gris.
Etapa 2	Definir Problema de investigación.
Etapa 3	Búsqueda y extracción de información.
Etapa 4	Recopilación, análisis y organización de la información obtenida, a partir de los objetivos del proyecto.
Etapa 5	Creación de los resultados y conclusiones de la investigación.
Etapa 6	Elaboración del artículo de carácter publicable, siguiendo los resultados esperados.

6.1. Etapa 1: Revisión de Literatura Gris.

El concepto de literatura gris empezó a ganar aceptación en los años 70 y está constituida por documentos informales, material domestico o extranjero que usualmente está disponible a través de canales diferentes a los sistemas de publicación comunes, o adquiridos por vendedores de libros, de forma que no sea controlada por editores comerciales (Ramos De Carvalho, 2001.). Inicialmente se encontraron los artículos mencionados en la sección 3.1., en donde se identificaron las palabras clave, a partir de esto se realizó una búsqueda en Google Scholar acerca de las AS/RS usando Automated Storage and Retrieval Systems y AS/RS, Se identificaron textos relevantes que

ayudan a dar un contexto apropiado sobre los sistemas, además algunos de estos nos introducen a los modelos metaheurísticos, que junto con los AS/RS vinieron a ser el enfoque de la investigación.

6.1.1. Tesoros, Palabras clave y Formula.

Los Tesoros son un conjunto de términos que usan para representar un campo del conocimiento y generalmente el contenido de dichos documentos de una base de datos, Debe contener al menos equivalencia, jerarquía o asociación entre estos, Además, su función es la de representar las necesidades de información de los usuarios, o sea las preguntas que tienen. (Codina & Pedraza-Jiménez, 2011).

Teniendo en cuenta la definición, a continuación, se buscan tesoros y palabras clave en los documentos iniciales y que se encontraron en la revisión de literatura gris, de las cuales se encontraron términos como AS/RS, Tipo de AS/RS, Metaheurísticas, NP-Hard, Problema de Optimización. A partir de estas se decidió indagar en las bases de datos Scopus y Web of science, buscando información que abarcara la aplicación de metaheurísticas en AS/RS, cuando se realizó la búsqueda de AS/RS junto a metaheurísticas solo daba como resultado 3 artículos, por la tanto, se creó una tabla con las metaheurísticas más usadas (Ver tabla 2) y se inició una búsqueda con estas, se identificaron específicamente las metaheurísticas usadas por los autores en los artículos y se realizó un ajuste a la fórmula para que solo tuviera la información necesaria y poder acortarla (Ver tabla 3).

6.1.2. Bitácora.

Cuando se obtuvo suficiente información para proceder con el proyecto, se realizó una bitácora, con el objetivo de almacenar los tesoros identificados en los nuevos artículos encontrados, y organizar datos de manera que facilite su búsqueda para las etapas posteriores del proyecto.

Tabla 8.

Bitácora

Bitácora										
Titulo	Año	Autor/es	Palabras clave	Resumen	Tipo	Diseño	Metaheurística	política	Problema	decisión

Para la creación de la Bitácora, se inició con las primeras cuatro columnas de información básica que son usadas para identificar el documento, a esto se agregó la sección del abstract, esto para ayudar en la búsqueda del contenido posterior, los cuales son las siguientes seis columnas, que fueron seleccionadas para filtrar los datos relevantes al tema de la investigación.

Inicialmente se creó la columna de tipo de AS/RS junto con la del diseño, esto dificultó la estandarización, haciendo la identificación de puntos comunes de tipo de AS/RS muy confusa, por lo tanto, se separaron las columnas y se digito únicamente el tipo de sistema Basado en el gráfico de tipos de AS/RS adaptado de Roodbergen & Vis (2009) mostrado en la sección 4.

En el apartado de diseño, se incluyó información de la configuración del sistema, como cantidad de pasillos, grúas, lanzaderas, funcionamiento del sistema, combinaciones de máquinas, uso de sistema en tres dimensiones (3D).

Continuamos con la sección de Metaheurísticas, en donde al igual que en tipo de AS/RS se buscó una estandarización, para que la clasificación resulte más sencilla, por lo tanto, el objetivo fue simplificar los modelos tomando en cuenta la metaheurística o combinación de metaheurística que se trabajó principalmente por los autores.

En la columna de política, se indagó en políticas de control o de almacenamiento en base a las definiciones expuestas con anterioridad en la sección ocho y cuatro del documento, durante la lectura inicial de los artículos se encontró poca información del tema en la mayoría de estos,

aun así, se espera que durante la lectura completa y minuciosa se disponga de las políticas de la mayoría, si no, de todos los artículos.

Finalmente, para la sección del problema de optimización se encontraron varios casos de combinaciones de problemas en donde se busca llegar a una solución satisfactoria teniendo en cuenta dos problemas simultáneamente, un caso de estos es el de asignación de ubicaciones y de secuenciación, además de estos, cabe recalcar artículos en donde se buscaba realizar un diseño de AS/RS y presentar modelos de optimización, y para la decisión, en muchos casos se tuvo en cuenta el problema que se manejaba.

Teniendo en cuenta lo anterior, se concluye que la bitácora funciono para identificar y clasificar los puntos más importantes para el cumplimiento de los objetivos propuestos en el proyecto, se continuara usando para la organización de la información que se obtendrá en las posteriores etapas del proyecto, y se aprovechara para la creación de las conclusiones de este.

6.2. Etapa 2: Definir Problema de Investigación

Durante la primera etapa de revisión de literatura gris se identificó la importancia de los sistemas AS/RS en la industria actual y el potencial para ser el futuro de la logística de almacenamiento, esto debido a su flexibilidad y que a medida que la tecnología siga avanzando será cada vez más sencillo su implementación desde costos hasta funcionalidad, esta fue la principal razón de interés que surgió para la decisión de centrar el proyecto en las AS/RS, A partir de acá se encontraron artículos sobre la optimización de los sistemas usando modelos matemáticos metaheurísticos, y realizando más indagación no se encontró una organización de cuáles son los modelos más usadas en los sistemas, esta información resulta muy útil para personas que quieren realizar trabajos de optimización a las AS/RS.

En este orden de ideas el propósito del proyecto es presentar información al usuario de los modelos, métodos y descubrimientos de los anteriores investigadores durante su ejercicio de aplicación de las metaheurísticas a los problemas de optimización de los AS/RS, mediante una clasificación de metaheurísticas en base al problema de optimización y después al tipo de sistema que se trabajó.

6.3. Etapa 3: Búsqueda y Extracción.

6.3.1. Selección de las Bases de Datos

Se realizó una búsqueda a través de la plataforma de la biblioteca de la Universidad Industrial de Santander, de la cual se decidió hacer uso de las bases de datos Scopus y Web of science, ya que, su fácil interfaz y filtración de datos ayuda durante la búsqueda y eliminación de información.

6.3.2. Revisión de Literatura en Sitios Especializados y Creación de la Ecuación de Búsqueda.

A partir de las bases de datos seleccionadas se inicia una indagación acerca de las fórmulas usadas en cada una, en el proyecto se hizo uso principalmente de los operadores AND, OR, AND NOT, el uso de AND permitía buscar AS/RS y metaheurísticas en el mismo artículo, el operador OR, permitía la búsqueda por nombre específico de metaheurística sin excluir ninguno, de esta forma la fórmula buscaba artículos que tuvieran AS/RS junto con metaheurísticas o AS/RS junto con algoritmo genético o de recocido simulado, con el objetivo de incluir toda la cantidad de información relevante, y finalmente el uso de AND NOT no permitía que ingresaran palabras como AS/RS que pertenecen a otra rama, excluyendo información no relacionada a la ingeniería.

Finalmente, la ecuación general de búsqueda quedó como TITLE-ABS-KEY ("Automated Storage and Retrieval System" OR "AS/RS") AND TITLE-ABS-KEY ("Metaheuristic*" OR "Simulated Annealing" OR "SA" OR "Tabu Search" OR "TS" OR "Genetic Algorithm" OR "GA"

OR "Particle Swarm Optimization" OR "PSO" OR "Local Search" OR "LS" OR "Harmony Search" OR "HS" OR "Ant Colony Optimization" OR "ACO") AND NOT TITLE-ABS-KEY ("as RS" OR "as rs")Y por último se aplicaron filtros de año de publicación para obtener datos lo más actualizados posibles.

6.3.3. Extracción de Información.

Después de la búsqueda de documentos, se inicia un proceso de selección, para identificar los que cumplen las condiciones necesarias para trabajar en el proyecto. A continuación, se presentan los criterios de inclusión que se tuvieron en cuenta para la selección. En primer lugar, las bases de datos nos permiten identificar aquellos artículos que contengan en su título y en su Resumen las palabras clave usadas en la formula, en segundo lugar, se toma la decisión de incluir documentos desde el año 2010 hasta el presente año 2024, de esta manera se tiene información más relevante a nuestra época manteniendo la cantidad de documentos idónea, en tercer lugar se excluyen documentos que hayan pasado el filtro del AND NOT y contengan información que no es relevante a la rama de la ingeniería, Tercer lugar excluir documentos repetidos entre las bases de datos y por ultimo excluir documentos a los que la Universidad Industrial de Santander no tiene acceso.

6.4. Etapa 4: Recopilación de Información

Los documentos seleccionados a través de los criterios de inclusión y exclusión pasan a ser evaluados y clasificados en base a su resumen, se consideran los aspectos de Título, Nombre original del documento, Año de publicación, Tiempo que fue publicado, Autores, Responsables del documento, Palabras clave de los autores, Refleja contenido del documento, Resumen, Síntesis de lo que se pretende en el documento, Tipo de AS/RS, cual es el tipo de AS/RS que se está trabajando, Diseño de AS/RS, configuración y específicos del sistema, Metaheurística, Modelo

matemático que se está usando para mejorar el sistema, Política, Política de control o almacenamiento que se propone o se está aplicando al sistema, Problema de optimización, Problema que se pretende mejorar, Decisión, la variable que se quiere optimizar. Como resultado se creó el archivo de Excel de la Bitácora presentada como Apéndice B en la sección de apéndices.

A partir de esta organización previa, Se pretende seguir usando esta herramienta de la bitácora para realizar una extracción del contenido más relevante a los objetivos del proyecto de los documentos, pero esta vez en base al documento completo con una revisión más exhaustiva, de modo que se obtenga una tabla en donde se pueda extraer la información de manera más sencilla y organizada a través de la herramienta de filtros de Excel, permitiendo la clasificación en la que se basa este proyecto.

6.5. Etapa 5: Obtención y Análisis de los Resultados

En esta quinta etapa, se reafirman los datos extraídos en las etapas anteriores y se empieza a realizar la identificación, organización y clasificación de las metaheurísticas primero con base al problema de optimización, y después al tipo de AS/RS teniendo en cuenta el diseño y las políticas de control que utilizaron los investigadores, además de una conclusión corta en un párrafo final de cada subsección de la clasificación, donde se destacan los estudios que realizaron comparaciones en el mismo diseño, obtenida a partir de la interpretación de las lecturas, así como, finalmente se discuten los hallazgos y se realiza un análisis de frecuencias del uso de las Metaheurísticas por tipo de AS/RS, problema de optimización y objetivo de decisión.

6.6. Etapa 6: Artículo de Carácter Publicable

En la última etapa con el fin de una difusión del conocimiento obtenido en este proyecto que podría resultar importante para Estudiantes que buscan continuar con la investigación y aplicación de metaheurísticas o incluso para empresas buscando optimizar sus sistemas, se propuso

la elaboración de un artículo de investigación de carácter publicable que facilite a sus usuarios obtener esta información y encontrar puntos a tener en cuenta en su aplicación.

7. Metaheurísticas en la optimización de los AS/RS

En la programación de las AS/RS se encuentran preguntas ya sea respecto a la organización, ubicación, secuencia, repartición de los materiales, bienes, grúas. Para obtener una mejor eficiencia en el sistema, a estas preguntas se le llaman problemas de optimización, En la literatura se evidencian varios de estos problemas como por ejemplo el problema de la programación, problema de secuenciación, el problema de la dosificación, problema de la programación, el problema de asignación y problema de diseño de AS/RS que identifica la pregunta que quiere resolver el autor en su sistema.

Por lo tanto, se procede a realizar la clasificación de las Metaheurísticas según el problema de optimización y el tipo de sistemas de AS/RS, iniciara con la problemática del AS/RS, junto con las Metaheurísticas y sistemas con los que trabajaron los autores.

7.1. El Problema de la Programación (The Scheduling Problem)

Este problema busca encontrar soluciones con la mejor programación posible que cumpla con los objetivos de optimización, dentro de este problema podemos encontrar el problema de la programación de tareas o el *task scheduling problem* que consiste en asignar las tareas a procesadores del sistema para optimizar el rendimiento, también encontramos el problema de programación de talleres o *job shop scheduling problem* que su objetivo es encontrar formas de asignar trabajos a máquinas y líneas que se encuentran en el taller minimizando costes, retrasos y distancias. En la literatura se encontraron estos dos tipos, además de problema de programación específico de partes del AS/RS y combinaciones con otros.

Inicialmente se encontró el proyecto “*A Genetic Algorithm for the Job Shop on an ASRS Warehouse*” por Figueiredo et al. (2012). En el que emplean un algoritmo genético para el problema de la programación de talleres en un almacén con AS/RS con el objetivo de maximizar la producción y cumplir a tiempo con los pedidos. El taller cuenta con un AS/RS que contiene once pasillos de estanterías para palés, con capacidad para 40000 palés, cada pasillo incluye una maquina transportadora de almacenaje y recuperación (*S/R*) que funciona en modo de doble comando, lo que significa, que puede realizar ambas operaciones en un mismo comando, además del sistema de AS/RS, el taller tiene carretillas elevadoras que trasladan los palés a los camiones ubicados en los 13 muelles disponibles. En el problema de programación de talleres se pueden encontrar 3 tipos de soluciones, semi activas, activas y sin retrasos, estas son conjuntos en donde, las soluciones sin retrasos se encuentran dentro de las activas, que se encuentran dentro de las semiactivas, la solución óptima al problema se encontraría en el conjunto de activas y por lo tanto también en el de semiactivas, en el caso de este proyecto, las soluciones obtenidas por el algoritmo genético trabajado entran en las sin retrasos, significa que no se obtendrá una solución óptima, aun así, la calidad de las soluciones es razonable y se consigue un tiempo computacional menor para obtenerlas. El algoritmo genético comienza con la generación de la población y su evaluación, los más aptos son seleccionados como padres, se aplica cruce y se genera una nueva población que procede a ser evaluada, se comparan los nuevos elementos con sus progenitores para seleccionar los nuevos progenitores, se repite el proceso hasta que se encuentra una solución con condiciones adecuadas. Durante los experimentos se realizaron 15 ejecuciones de cada configuración con dos poblaciones, una de 20 individuos y otra de 100, y se obtuvieron los mejores resultados en el experimento con 100 aunque toma más tiempo computacional.

A continuación, se presenta el estudio “*Optimal Scheduling for Retrieval Jobs in Double-Deep AS/RS by Evolutionary Algorithms*” por Wu et al. (2013). En el que se aplica algoritmo genético (GA), algoritmo genético inmune (IGA), y optimización por enjambre de partículas (PSO) al problema de la programación para trabajos de recuperación en AS/RS de doble profundidad para obtener la menor distancia viajada por el S/R en el proceso de recuperación, el AS/RS está compuesto por 20 filas, 30 columnas y 2 espacios de profundidad, para los experimentos realizaron 100 iteraciones diferentes y se estudiaron 5 casos, el primer caso se trabajó sin superposiciones de mercancías y en el resto de casos se aumenta superposición de mercancías de cinco en cinco, finalmente se compararon los métodos y en términos de tiempo computacional la optimización por enjambre de partículas trabajo mejor que las otras en todos los casos, mientras que en términos de calidad de soluciones el IGA genera mejores resultados.

Ahora el estudio “*A genetic algorithm for optimization of integrated scheduling of cranes, vehicles, and storage platforms at automated container terminals*” por Homayouni et al. (2014). En donde proponen un algoritmo genético para el problema de la programación integrada de grúas, vehículos y plataformas en un sistema SP-AS/RS con el objetivo de minimizar los retrasos en las tareas de las grúas. Hacen uso de la heurística vehículo más temprano disponible o (EAV) para asignar los vehículos, además, asumen que los tiempos de transporte de las grúas y vehículos cargados y vacíos son los mismos, no se tienen en cuenta las congestiones de los vehículos en el trayecto guía, el tiempo de transferencia entre los distintos equipos es lo suficientemente corto para ser ignorado y la política del punto de permanencia para todos los tipos de equipos de manipulación (permanecen en el lugar donde termino su última tarea), usan un algoritmo genético común para resolver el problema y lo comparan con algoritmo recocido simulado (SA), hacen uso del modelo de programación entera mixta o MIP para obtener el resultado óptimo, que en casos de escala

grande tarda más de 9 horas en obtenerlo la computadora, con el resultado óptimo se saca la diferencia de optimalidad en porcentaje y se comparan las dos metaheurísticas, en el caso de pruebas de tamaño mediano y grande las soluciones encontradas por GA son un 13,5% mejores a las halladas por el SA, específicamente se encuentra un rendimiento superior cuando el número de grúas es de tres o más y el número de tareas por grúa es de diez o más. En el siguiente artículo “*A polychromatic sets theory based algorithm for the input/output scheduling problem in ASRSs In order to overcome the defect of precocious phenomena*” por Z. Yang et al. (2019). En el que presentan un problema de programación de entradas/salidas (I/O) en un AS/RS con una sola lanzadera que busca minimizar el tiempo total de viaje para esto proponen un modelo híbrido entre algoritmo genético (GA), teoría de conjuntos policromáticos (PS) y recocido simulado (SA), donde PS se utiliza para asignar razonablemente la ubicación de las mercancías de entrada/salida de manera que mejora la calidad de la población inicial para el GA, además se usa el SA para reducir la posibilidad de convergencia prematura y obtener una solución satisfactoria durante el proceso iterativo, el sistema lo presentan de modo que una estantería de almacenamiento está instalada a lo largo de un pasillo y que un S/R de una sola lanzadera puede moverse a lo largo del pasillo, además el punto I/O se encuentra en un extremo del pasillo y se realizan solicitudes de almacenamiento y recuperación. Posteriormente realizaron experimentos utilizando solo el GA con 380 iteraciones, después PS-GA con 300 iteraciones y finalmente GA-PS-SA con 100 iteraciones, obtuvieron como resultado que la mejor solución y el mejor promedio de soluciones fue dado por el modelo híbrido propuesto.

En el trabajo “*An integrated optimization of location assignment and storage/retrieval scheduling in multi-shuttle automated storage/retrieval systems*” por P. Yang et al. (2015). Proponen un algoritmo de búsqueda tabú con dos fases para resolver el problema de la asignación

de ubicaciones y la programación del almacenamiento y recuperación simultáneamente (LASRSP) en un AS/RS con múltiples lanzaderas, El AS/RS que utilizaron en este estudio consiste de un único pasillo atendido por una maquina S/R con múltiples lanzaderas la cual se desplaza vertical y horizontalmente simultáneamente a velocidad constante, y todas las solicitudes de almacenamiento y recuperación se procesan siguiendo el principio de FCFS (First Come First Serve) que significa que la primera operación que llegue al sistema es la primera que se resuelve. Decidieron realizar la búsqueda tabú en dos fases para integrar la toma de decisión de los dos problemas que se están abarcando de una manera computacionalmente eficiente, primero se hace una fase de asignación de ubicaciones del algoritmo usando la primera búsqueda tabú, posteriormente utilizan la otra búsqueda tabú para encontrar una buena ruta que visite todas las ubicaciones seleccionadas en el anterior paso. Para los experimentos se comparó con un algoritmo genético (GA) que resuelve el problema de asignación de ubicaciones más una heurística del vecino más cercano modificado (MNN) que resuelve el problema de la programación, y los resultados que obtuvieron muestran que, el algoritmo tabú de dos fases es capaz de generar mejores soluciones en un tiempo razonable, además entre más grande el tamaño del problema se nota más la eficiencia computacional del algoritmo propuesto por el autor. En el caso del proyecto *“Concurrent optimization of shared location assignment and storage-retrieval scheduling in multi-shuttle automated storage and retrieval systems”* por Kazemi et al. (2019). Se aborda el mismo problema de asignación de ubicaciones y programación en el mismo sistema AS/RS de varias lanzaderas, pero esta vez bajo la política de almacenamiento compartido con un procedimiento de solución que incluye el algoritmo de colonia de hormigas, búsqueda adaptativa de grandes vecindarios y algoritmo de recocido simulado con el objetivo de maximizar cantidad de cargas y minimizar tiempos de viaje, para el modelo, tuvieron en cuenta que todas las tareas de

almacenamiento y recuperación se asignan a un conjunto de ciclos de operación, cuando un ciclo de operación se completa, se comienza el siguiente inmediatamente, el número de tareas de almacenamiento es igual al número de tareas de recuperación y el tiempo necesario para recoger o depositar una carga es constante. Finalmente obtuvieron mejores resultados en promedio con búsqueda adaptiva de grandes vecindarios en comparación con los otros dos algoritmos. Para el trabajo “*Integrated Optimization of Input-Output Point Assignment and Twin Stackers Scheduling in Multi-Input-Output Points Automated Storage and Retrieval System by Ant Colony Algorithm*” por Song & Mu (2022). En donde se trabaja el problema de agrupación y programación en un AS/RS con múltiples apiladores y puntos I/O para minimizar el tiempo de espera para estos, aplicando el algoritmo de optimización de colonia de hormigas (ACO). El sistema este compuesto por dos filas de racks con puntos I/O que se distribuyen en ambos lados del pasillo, y los apiladores gemelos que pueden manejar dos contenedores al mismo tiempo comparten el mismo pasillo y no pueden cruzarse entre sí. Para la experimentación se usó CPLEX para obtener los resultados óptimos y compararlo con el algoritmo propuesto, se obtuvo que en instancias de tamaño pequeño ACO puede obtener la solución óptimo o casi óptima con gran probabilidad, además el tiempo de espera promedio es bastante cercano al óptimo y con un tiempo computacional mucho menor al de CPLEX, mientras que en el caso de instancias de tamaño grande se comparó con CPLEX y el algoritmo por fases (PA), en este caso el rendimiento de ACO es superior al de PA, con una diferencia promedio en el resultado de 0.4% con CPLEX, mientras que PA obtuvo una diferencia promedio del 12%. En el siguiente proyecto “*A Mixed Algorithm for Integrated Scheduling Optimization in ASRS and Hybrid Flowshop*” por Lu et al. (2022). En donde trabajan el problema integrado de la programación en un AS/RS y un taller de flujo híbrido (Hybrid Flowshop) con una combinación entre el algoritmo genético y optimización de las aves migratorias (GA-MBO) para

minimizar el tiempo de operación del AS/RS y el tiempo de espera del taller de flujo híbrido. Para formular el modelo asumen que la grúa solo puede cargar un contenedor o un palet a la vez, movimientos horizontales y verticales son independientes, el tiempo de arranque y frenado de la grúa se ignora y el tiempo de recogida es fijo, no se tiene en cuenta fallo del equipo y el espacio de memoria de la sala de equipos tiene capacidad infinita, del algoritmo propuesto se usa el GA para combinar las ventajas de la gran capacidad de optimización global del algoritmo genético y la capacidad de búsqueda local de MBO. Para la experimentación se comparó con tres algoritmos, el algoritmo genético mejorado, optimización de enjambre de partículas mejorado y un híbrido entre estos dos, los resultados mostraron que el algoritmo híbrido propuesto se desempeña mejor en eficiencia y calidad de la respuesta.

En el siguiente proyecto llamado “*Task scheduling model of doubledeep multitier shuttle system Processes*” por Wang et al. (2019). En el que investigan la optimización del problema de programación de tareas en un sistema de múltiples lanzaderas de doble profundidad con el objetivo de minimizar el tiempo total de recuperación con un algoritmo de recocido simulado modificado (SAA), el AS/RS cuenta con varios niveles en un pasillo, tiene un punto I/O en cada planta y posee una lanzadera que se encarga del movimiento horizontal y un elevador que se encarga del movimiento vertical. El SAA es un algoritmo de optimización general, supera el defecto del mínimo local y la dependencia del valor inicial en el proceso de optimización que otros algoritmos poseen y tiene un fuerte rendimiento de búsqueda local. Para los resultados recogieron datos de anteriores investigaciones que tratan este mismo problema y lo compararon después de optimizarlo con su modelo, obteniendo mejorías entre 10% y 13%.

Ahora en “*An NSABC algorithm for multi-aisle AS-RS scheduling optimization*” por Yan et al. (2021). Trabajan en un sistema AS/RS multi pasillo con maquina S/R multi portadora y

proponen un algoritmo de colonia de abejas artificial de clasificación no dominante (*NSABC*) para resolver el problema de programación con el objetivo de minimizar el tiempo total de ejecución y la penalización total por retrasos. Para desarrollar el modelo supusieron que solo habría una maquina S/R, la velocidad horizontal y vertical son constantes, la maquina S/R se puede mover vertical y horizontalmente simultáneamente, y no se tienen en cuenta tiempos de recogida o almacenamiento. En cuanto al NSABC, utilizaron el algoritmo genético de ordenación no dominante (*NSGA-II*) como marco de su algoritmo y el algoritmo de colonia de abejas por su buen rendimiento en la búsqueda de soluciones vecinas, que es un factor importante en este tipo de problemas, para los resultados el algoritmo fue probado en 30 instancias y se comparó con el mismo algoritmo NSGA-II además de los algoritmos EMBBO y MOEA/D, obtuvieron como resultado que el algoritmo propuesto consigue mejores resultados que los otros en los objetivos propuestos después de análisis estadísticos. También se encuentra el artículo “*Research on scheduling strategy for automated storage and retrieval system*” por Geng et al. (2022). En el que se trabaja en un problema de optimización de la programación en un sistema AS/RS con apiladores duales de dos extremos (*two-end dual stackers scheduling model*) o (*TDSM*), proponiendo un nuevo algoritmo genético mejorado (*NIGA*) con el objetivo de minimizar tiempos de viaje de los apiladores. Este sistema con TDSM viene equipado con dos estaciones I/O y dos apiladores, tiene un principio de anti colisión mejorado que permite trabajar a los apiladores de forma segura durante las operaciones y permite dividir el intervalo de trabajo óptimo para el apilador y asignar tareas, además asumen que una vez ejecutado un ciclo de operación inicia el siguiente el apilador izquierdo solo sirve al punto I/O izquierdo y el derecho solo al I/O derecho, solo se almacena una vez por tarea, la velocidad horizontal y vertical es constante y se ignoran tiempos de recogida y depósito. Ahora durante la experimentación se comparó el algoritmo

propuesto con GA y AGA, en un sistema de AS/RS común y uno con TDSM, los resultados obtenidos en la eficiencia de la ruta en ambos casos son mejores usando el modelo NIGA, y aun mejores en el sistema TDSM. El siguiente proyecto “*Retrieval scheduling in crane-based 3D automated retrieval and storage systems with shuttles*” por Dong et al. (2021). Estudia únicamente el proceso de recuperación en un problema de programación en un AS/RS en 3D basado en grúas, minimizando el tiempo de espera de completar un set de recuperaciones, para esto hace uso de un algoritmo genético (GA), la heurística tiempo de espera más corto primero (LW), primero en llegar primero en salir (FCFS) y porcentaje de prioridad al transbordador (PPS). Es un sistema 3D con mecanismos de movimiento en profundidad (*DMMs*) basado en lanzaderas y es un sistema muy usado debido a la gran capacidad de manejo de una gran variedad de pedidos con alta frecuencia. Para los experimentos se generaron aleatoriamente pequeños casos para comprar el rendimiento, y los resultados indican que GA es el mejor algoritmo en problemas pequeños, sin embargo, cuando el tamaño aumenta LW se vuelve el mejor algoritmo en base a la calidad de las soluciones y el tiempo que tarda en obtenerlas.

Finalmente, para el caso del problema de optimización de recuperación se revisa el proyecto “*Simulation Based Optimization Approaches for Dealing with Dual-Command Crane Scheduling Problem in Unit-Load Double-Deep ASRS Considering Energy Consumption*” por Hsu et al. (2022). Que se trabaja en un AS/RS de carga unitaria y doble profundidad con el objetivo de minimizar el consumo de energía, para esto se desarrollan varios métodos de solución para comparar, se formula un algoritmo genético (GA), FCFS, optimización por enjambre de partículas (PSO), RANDOM, Algoritmo de optimización de ballenas (WOA), WOA mejorado con características de movimiento adaptivo y mutación desarrollado para resolver problemas discretos junto con programación dinámica (IWOA+DP). Para la generación del modelo los autores

asumieron que cada solicitud de almacenamiento/recuperación está asociada a una SKU, la grúa se desplaza horizontal y verticalmente simultáneamente, y no se produce ninguna interrupción durante las operaciones de transporte, almacenamiento y recuperación. Durante los experimentos, obtuvieron que la heurística RANDOM generaron mejores resultados que FCFS, esto debido a que está dotado de un mecanismo iterativo que le da más posibilidades de encontrar una solución mejor, aun así, ninguna heurística supero a ninguna metaheurística, y en general el algoritmo más eficiente en tiempo computacional y que obtuvo una mejor solución promedio para minimizar el consumo de energía, fue la metaheurística hibrida IWOA+DP.

En los artículos que abordan el problema de la programación, se identificaron cinco estudios en los que los autores aplicaron diferentes metaheurísticas en el mismo diseño y compararon sus resultados. En el segundo artículo, en el tercer párrafo de la subsección, los autores desarrollaron un algoritmo genético (GA) y optimización por enjambre de partículas (PSO). Al comparar ambos, se observa que cada uno se desempeña mejor en distintos aspectos. El algoritmo genético y sus variantes tienden a obtener mejores resultados en cuanto a distancias recorridas, probablemente debido a que, en su estructura, el GA explora un conjunto más diverso de soluciones gracias al cruce y la mutación. Sin embargo, esta capacidad de exploración también puede aumentar el tiempo computacional en comparación con PSO, que utiliza la mejor solución encontrada por cualquier partícula, reduciendo así el espacio de búsqueda y logrando una respuesta más rápida. En el quinto artículo, específicamente en el quinto párrafo de la subsección, se compara el GA con un algoritmo Tabú de dos fases (TS). En este caso, TS supera al GA, posiblemente porque la lista Tabú evita ciclos y repeticiones, lo que mejora la eficiencia computacional.

Los últimos tres artículos revisados se centran en metaheurísticas híbridas, que muestran un mejor rendimiento que las tradicionales. En el cuarto artículo, en el cuarto párrafo, se presenta

una metaheurística híbrida que combina algoritmo genético, recocido simulado y conjuntos policromáticos (GA-SA-PS). Esta combinación se compara con GA y GA-PS, destacando que el enfoque híbrido logra mejores soluciones con mayor eficiencia computacional. Esto se debe a que el recocido simulado (SA) mejora la búsqueda local del GA al reducir las opciones para el cruce y mutación, refinando las soluciones más rápidamente. Además, los conjuntos policromáticos (PS) ayudan en la optimización de la programación, lo que hace que la combinación de las tres técnicas sea superior. Sería interesante comparar esta combinación con una híbrida entre GA y SA para evaluar el impacto positivo de incluir PS y determinar si realmente aporta una ventaja significativa.

El octavo artículo compara el algoritmo genético combinado con la optimización de aves migratorias (GA-MBO) frente a GA y MBO por separado. La combinación GA-MBO permite aprovechar lo mejor de ambas técnicas: GA realiza una exploración global exhaustiva y maneja un espacio de soluciones amplio, lo que le permite obtener resultados de buena calidad, mientras que MBO, al igual que SA, mejora la búsqueda local, ayudando a GA a enfocarse en los mejores resultados posibles. Como resultado, se obtiene una mayor eficiencia computacional y adaptabilidad, logrando mejores soluciones en menor tiempo que al usar las metaheurísticas por separado.

Por último, en el artículo final de la subsección, se compara la optimización de ballenas mejorada con programación dinámica (IWOA-DP) con la optimización de ballenas estándar (WOA), el algoritmo genético (GA) y PSO. El algoritmo IWOA-DP supera a las otras metaheurísticas tanto en tiempo computacional como en calidad de resultados. Esto se debe a que la programación dinámica (DP) mejora la capacidad de optimización local del IWOA, que ya destaca por su excelente exploración global y su estructura de búsqueda eficiente. A pesar de esto, cabe mencionar que PSO sigue siendo competitiva en cuanto a eficiencia computacional.

En conclusión, en el contexto del problema de la programación, se observa un uso destacado de GA, ya que, entre las metaheurísticas individuales mencionadas, es uno de los más eficaces en términos de obtener resultados de alta calidad, junto a WOA. Esto se debe a que su estructura permite una exploración amplia del espacio de soluciones. En cuanto a la eficiencia computacional, es importante señalar que SA, MBO y PSO se caracterizan por su velocidad y capacidad de búsqueda local. Por lo tanto, la combinación de estas metaheurísticas podría proporcionar las mayores ventajas en la resolución del problema.

Finalmente, en relación con la aplicabilidad de los estudios que abordan el problema de la programación, se observa que el tercer artículo asume que no se consideran las congestiones de los vehículos en el trayecto. El octavo artículo, por su parte, no toma en cuenta los fallos del equipo y asume que la capacidad de memoria de los dispositivos es infinita. Por último, el último artículo postula que no hay interrupciones durante el transporte, almacenamiento y recuperación. Estas suposiciones no reflejan lo que podría suceder en una planta real, lo que limita la aplicabilidad de estos estudios. No obstante, es importante evaluar si, a pesar de no tener en cuenta estos factores, los resultados en términos de eficiencia computacional y la minimización de los objetivos de decisión se verían realmente afectados.

Se presenta la tabla 9 que presenta la información de los estudios condensada.

Tabla 9.

Resumen de los estudios clasificados que usaron el problema de programación

Parte A.

Problema de programación				
Título	AS/RS	Metaheurística/s	Objetivo de decisión	Resultados
A Genetic Algorithm for the Job Shop on an ASRS Warehouse	Almacén con AS/RS	Algoritmo genético	Minimizar tiempos de viaje	se obtuvieron los mejores resultados en el experimento con 100 individuos
Optimal Scheduling for Retrieval Jobs in Double-Deep AS/RS by Evolutionary Algorithms	AS/RS de doble profundidad	Algoritmo genético, algoritmo genético inmune y optimización por enjambre de partículas	Minimizar tiempos de viaje	PSO trabajo mejor en eficiencia computacional, mientras que calidad de resultado IGA es mejor
A genetic algorithm for optimization of integrated scheduling of cranes, vehicles, and storage platforms at automated container terminals	SP-AS/RS	Algoritmo genético y recocido simulado	Minimizar retrasos	GA encuentra mejores resultados, mientras que SA es más eficiente
A polychromatic sets theory based algorithm for the input/output scheduling problem in ASRSs In order to overcome the defect of precocious phenomena	AS/RS tradicional	Combinación de algoritmo genético, recocido simulado y teoría de sets policromáticos	Minimizar tiempos de viaje	GA-PS-SA con 100 iteraciones, obtuvieron la mejor solución
An integrated optimization of location assignment and storage/retrieval scheduling in multi-shuttle automated storage/retrieval systems	AS/RS con múltiples lanzaderas	Búsqueda tabú de dos fases y algoritmo genético	Minimizar tiempos de viaje	el algoritmo tabú de dos fases es capaz de generar mejores soluciones en un tiempo razonable y con buena calidad
Concurrent optimization of shared location assignment and storage-retrieval scheduling in multi-shuttle automated storage and retrieval systems	AS/RS con múltiples lanzaderas	Híbrido entre optimización de colonia de hormigas, búsqueda en el vecindario y recocido simulado	Minimizar tiempos de viaje	mejores resultados en promedio con búsqueda adaptativa de grandes vecindarios
Integrated Optimization of Input-Output Point Assignment and Twin Stackers Scheduling in Multi-Input-Output Points Automated Storage and Retrieval System by Ant Colony Algorithm	AS/RS tradicional	Optimización de colonia de hormigas	Minimizar el tiempo de espera	ACO puede obtener la solución óptima o casi óptima con gran probabilidad, además el tiempo de espera promedio es bastante cercano al óptimo
A Mixed Algorithm for Integrated Scheduling Optimization in ASRS and Hybrid Flowshop	AS/RS tradicional	Algoritmo genético combinado con optimización de aves migratorias	Minimizar tiempos	El algoritmo híbrido propuesto se desempeña mejor en eficiencia y calidad de resultados

Parte B.

Task scheduling model of doubledeep multitier shuttle system Processes	AS/RS de múltiples lanzaderas y doble profundidad	Recocido simulado modificado	Minimización de tiempos	Obtuvieron mejoras entre el 10% y el 13% en comparación a otros modelos
An NSABC algorithm for multi-aisle AS-RS scheduling optimization	AS/RS multi pasillo con maquina S/R	Algoritmo de colonia de hormigas artificial no dominante	Minimizar el tiempo total de completar un ciclo	el algoritmo propuesto consigue mejores resultados que los otros en los objetivos propuestos y eficiencia después de análisis estadísticos.
Research on scheduling strategy for automated storage and retrieval system	AS/RS con apiladores duales de dos extremos	Algoritmo genético mejorado y nuevo	Minimizar los tiempos de viaje	los resultados obtenidos en la eficiencia de la ruta en ambos casos son mejores usando el modelo NIGA
Retrieval scheduling in crane-based 3D automated retrieval and storage systems with shuttles	AS/RS en 3D	Algoritmo genético, primero en llegar primero en salir, porcentaje de prioridad al transbordador y la heurística de tiempo de espera mas corto	Minimizar el tiempo de espera	GA es el mejor algoritmo en problemas pequeños, sin embargo, cuando el tamaño aumenta LW se vuelve el mejor algoritmo en base a la calidad de las soluciones y el tiempo que tarda en obtenerlas
Simulation Based Optimization Approaches for Dealing with Dual-Command Crane Scheduling Problem in Unit-Load Double-Deep ASRS Considering Energy Consumption	AS/RS de carga unitaria y doble profundidad	Algoritmo genético, optimización por enjambre de partículas, optimización de ballenas y optimización de ballenas con programación dinámica	Minimizar el consumo de energía	el algoritmo más eficiente en tiempo computacional y que obtuvo una mejor solución promedio para minimizar el consumo de energía, fue la híbrida IWOA+DP

7.2. Problema de la secuenciación

En el problema de la secuenciación se tiene que determinar la mejor secuencia de realizar los trabajos de forma que se cumpla con los objetivos de optimización del sistema, en los trabajos que se procederán a exponer, se encontró el problema de la secuenciación original (*sequencing problem*), el problema de la secuenciación dinámica (*Dynamic sequencing problem*) en la cual se

secuencian las solicitudes cada vez que llega una nueva y utilizando fechas de vencimiento o prioridades para garantizar que la recuperación en el extremo del pasillo no se posponga demasiado (Nia et al., 2017) y una combinación del problema de la secuenciación con el problema de asignación de ubicaciones.

Inicialmente se encontró el artículo llamado “*Application of genetic algorithms for sequencing of ASRS with a triple-shuttle module in class-based storage*” por Popović et al. (2014). En el que trabajan el problema de la secuenciación en un AS/RS de triple lanzadera que opera con un almacenamiento basado en clases con un ciclo de comando séxtuple modificado del S/R, aplicando el algoritmo genético con el objetivo de minimizar los tiempos de ciclo. El sistema AS/RS opera en un almacenamiento basado en clases en forma de L con dos zonas y Para el modelo tuvieron en cuenta que hay una estación P/D en la esquina inferior izquierda del rack, que se utiliza para los flujos de entrada y salida, el S/R se puede mover horizontalmente y verticalmente de manera simultánea y tiene una velocidad conocida, las tareas de almacenamiento y recuperación se conocen al principio de la planificación, y se supone que el número de ubicaciones libres es mayor que el número de tareas de almacenamiento. Durante la experimentación compararon con Heurísticas usadas por otros autores y son consideradas las más adecuadas para este problema en ese sistema AS/RS, que son el vecino más próximo (*NN*), el vecino más próximo invertido (*RNN*) y el tramo más corto (*SL*), Como resultados obtuvieron que entre las Heurísticas la *SL* da los mejores resultados en promedio, esto debido a la longitud del número observado de tareas consideradas simultáneamente en cada paso del algoritmo, mientras que en comparación con la metaheurística propuesta evidenciaron que GA produce tiempos de viaje totales más cortos que *SL* y que además da mejores resultados cuando se aplica elitismo y mutación.

Ahora en el proyecto “*Bi-objective optimization for a two-depot automated storage retrieval system*” por Man et al. (2021). Se maneja el mismo tipo de problema, solo que esta vez con dos objetivos, minimizar el tiempo total de desplazamiento del S/R y la tardanza total del sistema simultáneamente en un AS/RS de dos depósitos y para esto diseñan un método de restricción exacta, un algoritmo genético de ordenación no dominante II (*NSGAI*) y un algoritmo heurístico que considera secuencia de localización, secuencia de tiempo de liberación, secuencia de fecha de vencimiento y secuencia aleatoria y lo abrevian como *LRDR*. El sistema este compuesto de dos depósitos situados a ambos lados de las estanterías de contenedores, para una tarea de almacenamiento, un camión transporta la carga desde un depósito hasta un transbordador, en donde el S/R lo recoge y se desplaza para completar el proceso. Para la metaheurística propuesta en el procedimiento de cruce y mutación que son usados para producir descendientes solo se tiene en cuenta la segunda parte del cromosoma que indica la secuencia del proceso de las tareas, ya que la primera parte que indica el índice de cada tarea es el mismo para todos los cromosomas. Ahora los resultados obtenidos en la experimentación indican que para instancias pequeñas, medianas y grandes *LRDR* y *NSGAI* se acercan bastante al resultado óptimo obtenido por el método de restricción exacta y con mayor estabilidad computacional, pero *LRDR* termina superando a *NSGAI* en calidad de soluciones y tiempo de cálculo.

El siguiente trabajo titulado “*Metaheuristic based control of a flow rack automated storage retrieval system*” por Bessenouci et al. (2012). Que aplica el algoritmo de búsqueda tabú y el algoritmo de recocido simulado al control de un AS/RS de racks dinámicos con el objetivo de minimizar el tiempo del ciclo de recuperación. El sistema está compuesto por un solo rack que consta de contenedores inclinados, los productos son cargados por una máquina de almacenamiento y se desplazan a través de rodillos inclinados hasta donde se recogen. Para la

experimentación se comparó las dos Metaheurísticas propuestas, la heurística del vecino más cercano y recuperación aleatoria, obtuvieron como resultados que las Metaheurísticas dan los mejores resultados cuando el número de productos diferentes es pequeño o mediano, y cuando es elevado el tiempo de recuperación es casi el mismo en todos los métodos.

Ahora continuaremos a revisar el proyecto “*Energy-conscious dynamic sequencing method for dual command cycle unit-load multiple-rack automated storage and retrieval systems*” por Nia et al. (2017). En el que trabajan el problema de la secuenciación dinámico en un AS/RS de carga unitaria y múltiples racks con doble ciclo de comando (DCC), con el objetivo de minimizar el costo energético del AS/RS, para esto proponen el uso del algoritmo genético y recocido simulado. En este modelo proponen tener en cuenta tarifas según la hora de uso y limitaciones del consumo total de electricidad, y añaden el tiempo de carga/descarga y el consumo de energía de la cinta transportadora y la maquina S/R para que el modelo sea más aplicable, Además asumen que la estación I/O está situada en la esquina izquierda de la cara de la estantería en ambos lados del pasillo, el S/R solo puede llevar una carga, pero funciona con DCC, al comienzo del turno de trabajo la S/R se encuentra en la estación I/O y permanece ahí después de cada ciclo, se sabe las velocidades y tiempos en sentido horizontal y vertical y la cantidad de energía consumida por los movimientos, se conoce las fechas de los pedidos de clientes y no hay escasez de existencias en el almacén. Para la experimentación realizaron 16 pruebas del problema con diferentes números de ordenes pequeñas, medianas, grandes y extra grandes, y los resultados indicaron que el GA tiene un rendimiento superior en términos de coste total, rendimiento de las instalaciones y coste de consumo de energía, pero el SA se desempeñó mejor en tiempo computacional.

Además del proyecto expuesto anteriormente se encontró “*Dual command cycle dynamic sequencing method to consider GHG efficiency in unit-load multiple-rack automated storage and*

retrieval systems” por Roozbeh Nia et al. (2017). Que trabaja con el mismo problema de optimización, mismo sistema AS/RS de carga única con doble ciclo de comando y hace uso de GA y optimización de colonia de hormigas (ACO) para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG), para poder generar eficiencia en GHG se consideran costos fiscales, coste de penalización y descuentos en el coste de las emisiones de GHG producidas por todas las instalaciones, también se considera las limitaciones en el tiempo disponible de todas las instalaciones y el total permitido de emisiones de GHG producidas por todos los equipos. En la experimentación compararon las dos Metaheurísticas propuestas y realizaron 20 ejemplos numéricos en categorías pequeña, mediana, grande y extra grande, y los resultados evidenciaron que GA presenta el mejor rendimiento en términos de costes y GHG producido, también se evidencio que a partir de los 300 pedidos la cantidad de GHG producida sobrepasa el límite para el descuento en costos.

Finalmente, el último proyecto que trabajo con este problema fue “*A case-based reasoning approach to fast optimization of travel routes for large-scale ASRSs*” por Huh et al. (2019). En este caso proponen comparar el método de razonamiento basado en casos o (*case-based reasoning*) o (*CBR*) con otros métodos usados anteriormente para resolver el problema de la secuenciación en conjunto con el problema de asignación de localizaciones en una AS/RS de lanzaderas múltiples con el objetivo de demostrar la eficiencia del modelo propuesto. Consideran que el AS/RS consta de un pasillo con dos racks a sus lados, un punto I/O en la esquina inferior izquierda y una maquina S/R de carga unitaria que se desplaza dentro del pasillo completando las operaciones. El método de solución propuesto CBR es un proceso que intenta resolver problemas nuevos utilizando la experiencia pasada. Durante la experimentación se comparó con la metaheurística búsqueda tabú, y las Heurísticas el vecino más cercano y el algoritmo del tramo más corto, y como resultado

demonstraron que el rendimiento de CBR es superior a los otros modelos en términos de tiempo de viaje y tiempo de cálculo, y además se va incrementando la diferencia en eficiencia a medida que se aumentan los racks.

En el caso de los problemas de secuenciación no se encontraron estudios que utilizaran combinaciones, se encontraron dos en los que comparan metaheurísticas, en el cuarto artículo que se encuentra en el párrafo 5 desarrollaron un algoritmo genético y recocido simulado y en el quinto artículo del siguiente párrafo comparan GA y optimización de colonia de hormigas (ACO), en ambos casos GA presenta la mejor calidad de soluciones de nuevo debido a su gran rango de búsqueda, mientras que SA y ACO generan los resultados de manera más eficiente, ACO debido a que las “hormigas” se adaptan a características del problema, como la disposición de los espacios y restricciones, lo que permite una búsqueda más eficiente, SA debido su ventaja en la búsqueda de soluciones locales y que logra salir de óptimos locales mediante la aceptación de soluciones un poco peores genera respuestas mas rápidamente.

En conclusión, de la subsección de problema de secuenciación no se presentan casos de uso de algoritmos híbridos y se tiende a usar más heurísticas para comparar que en el problema anterior, esto puede ser a que en este caso no se presenta una complejidad computacional muy alta en el problema. Ahora en cuanto a la aplicabilidad, en el caso del cuarto estudio tienen en cuenta tarifas según la hora de uso y limitaciones del consumo total de electricidad, y añaden el tiempo de carga/descarga y el consumo de energía de la cinta transportadora y la maquina S/R, de modo que el modelo sea mas realista, en cuanto a las asunciones, asumen que no hay escasez de existencias en el almacén, que en una situación real, podría ocurrir, pero solo generaría demoras en hasta que se reabastezcan los bienes, que es algo que se esperaría en cualquier proceso que los use, por lo tanto, este estudio se considera que tiene buena aplicabilidad.

A continuación, se presenta la tabla 10 que presenta la información de los estudios condensada.

Tabla 10.

Resumen de los estudios clasificados que usaron el problema de secuenciación.

Titulo	Problema de secuenciación			Resultados
	AS/RS	Metaheurística/s	Objetivo de decisión	
Application of genetic algorithms for sequencing of ASRS with a triple-shuttle module in class-based storage	AS/RS de triple lanzadera	Algoritmo genético	Minimizar los tiempos de ciclo	GA produce tiempos de viaje totales más cortos que SL y que además da mejores resultados cuando se aplica elitismo y mutación.
Bi-objective optimization for a two-depot automated storage retrieval system	AS/RS de dos depósitos	algoritmo genético de ordenación no dominante II (NSGAI) y un algoritmo heurístico abreviado como LRDR	Minimizar el tiempo total de desplazamiento del S/R	para instancias pequeñas, medianas y grandes LRDR y NSGAI se acercan bastante al resultado óptimo obtenido por el método de restricción exacta y con mayor estabilidad computacional, pero LRDR termina superando a NSGAI en calidad de soluciones y tiempo de cálculo.
Metaheuristic based control of a flow rack automated storage retrieval system	AS/RS de racks dinámicos	Algoritmo de búsqueda tabú, recocido simulado y dos heurísticas	Minimizar el tiempo del ciclo de recuperación	las Metaheurísticas dan los mejores resultados cuando el número de productos diferentes es pequeño o mediano, y cuando es elevado el tiempo de recuperación es casi el mismo en todos los métodos.
Energy-conscious dynamic sequencing method for dual command cycle unit-load multiple-rack automated storage and retrieval systems	AS/RS de carga unitaria y múltiples racks	Algoritmo genético y recocido simulado	Minimizar el costo energético	el GA tiene un rendimiento superior en términos de coste total, rendimiento de las instalaciones y coste de consumo de energía, pero el SA se desempeñó mejor en tiempo computacional.
Dual command cycle dynamic sequencing method to consider GHG efficiency in unit-load multiple-rack automated storage and retrieval systems	AS/RS de carga única	Algoritmo genético y optimización de colonia de hormigas	Minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero	GA presenta mejor calidad de resultados
A case-based reasoning approach to fast optimization of travel routes for large-scale ASRSs	AS/RS de lanzaderas múltiples	Método de razonamiento basado en casos	Minimizar el tiempo computacional	El rendimiento de CBR es superior a los otros modelos en términos de tiempo de viaje y tiempo de cálculo, y además se va incrementando la diferencia en eficiencia a medida que se aumentan los racks.

7.3. Problema de la dosificación de pedidos

En el problema de la dosificación de pedidos está relacionado con el proceso de planificación de preparación de pedidos (*Order Picking*) en un almacén como parte de la gestión de la cadena de suministro (Hernández, 2023). Este problema consiste en dividir el conjunto en lotes, en los que cada lote se recogerá y acumulará para el embalaje y el envío, y determinar una partición de los pedidos para su asignación a olas y recolectores (Gu et al., 2007). En esta revisión encontraremos el problema de dosificación y una combinación.

Primero se encontró el artículo “*Order batching in an automated warehouse with several vertical lift modules: Optimization and experiments with real data*” por Nicolas et al. (2018). En el que trabajan el problema de dosificación de pedidos en un AS/RS con módulos de elevación vertical (*VLM*) con el objetivo de minimizar el tiempo total para completar la recogida de todos los pedidos, usando la metaheurística de recocido simulado (*SA*), la principal asunción es la secuencia del recolector, que comienza repartiéndolo al *VLM* con mayor número de bandejas, después al de segundo mayor número de bandejas y así sucesivamente hasta que acabe todos los *VLMs*. Para la experimentación se comparó el algoritmo propuesto con las soluciones obtenidas en un modelo *CPLEX* en una hora y los resultados confirman que en promedio la metaheurística propuesta mejora la estrategia de dosificación entre un 33% y 35%, además que un aumento del número de pedidos incrementa el beneficio de usar *SA*, finalmente obtuvieron que después de 1 minuto las soluciones obtenidas por *SA*, son superiores a las soluciones obtenidas por *CPLEX* en una hora.

El otro artículo encontrado que embarca este problema es “*A joint optimisation of multi-item order batching and retrieving problem for low-carbon shuttle-based storage and retrieval*”

system” por H. Li et al. (2022). En conjunto con el problema de recuperación en un sistema SBS/RS con el objetivo de minimizar la energía total consumida para disminuir las emisiones de carbono relacionadas a esta, para esto proponen la solución con un algoritmo tabú (TS). Antes de iniciar el modelo los autores asumen en el sistema que toda la información sobre la demanda se conoce de antemano, y el número de lotes esta predeterminado, solo se tienen en cuenta los costos derivados del proceso de recuperación de cajas y este costo es igual al de almacenamiento, además, no se tienen en cuenta costos como los gastos generales y entrega de pedido, y por ultimo los lotes más pequeños tienen prioridad en la secuencia de recogida, por lo tanto si una caja va a ser recuperada por más de un lote, la caja pasara por los lotes de acuerdo con la secuencia de los lotes de menor tamaño a mayor. Para los experimentos se comparó el algoritmo propuesto con CPLEX y se pone un tiempo máximo de cálculo de 7200 segundos, resultando en que CPLEX puede resolver el problema de forma óptima en pequeñas instancias, aun así, TS hace uso de un tiempo computacional significativamente menor para obtener una solución cercana, mientras que en instancias más grandes, CPLEX no alcanza a hallar una solución óptima en el tiempo máximo, mientras que el algoritmo propuesto llega a soluciones efectivas con menor tiempo computacional y mejor adaptabilidad.

En la subsección dedicada al problema de dosificación de pedidos, no se identificaron casos en los que autores compararan diferentes metaheurísticas dentro del mismo diseño. En su lugar, ambos estudios utilizaron CPLEX, que proporciona la solución óptima, aunque a un alto costo computacional, alcanzando en algunos casos varias horas de procesamiento. Este enfoque se utilizó para evaluar la proximidad de las soluciones obtenidas por las metaheurísticas a la óptima. En cuanto a la aplicabilidad del sistema, no se encontraron elementos en la información presentada que pusieran en duda su relevancia o viabilidad en entornos prácticos.

Ahora se presenta la tabla 11 con un resumen de la subsección del problema de la dosificación de pedidos.

Tabla 11.

Resumen de los estudios clasificados que usaron el problema de la dosificación de pedidos.

Problema de la dosificación de pedidos				
Título	AS/RS	Metaheurística/s	Objetivo de decisión	Resultados
Order batching in an automated warehouse with several vertical lift modules: Optimization and experiments with real data	AS/RS con módulos de elevación vertical	Recocido simulado	Minimizar el tiempo total para completa la recogida de todos los pedidos	las soluciones obtenidas por SA, son superiores a las soluciones obtenidas por CPLEX en una hora.
A joint optimisation of multi-item order batching and retrieving problem for low-carbon shuttle-based storage and retrieval system	SBS/RS	Algoritmo tabú	minimizar la energía total consumida para disminuir las emisiones de carbono	el algoritmo propuesto llega a soluciones efectivas con menor tiempo computacional y mejor adaptabilidad

7.4. Problema de asignación de almacenamiento

El problema de la asignación de almacenes o (*SLAP*) consiste en asignar los productos entrantes a las zonas de almacenamiento con el fin de reducir los costes de manipulación y mejorar la utilización del espacio (Gu et al., 2007). En esta sección se encontrarán cinco proyectos enfocados en el problema de asignación en conjunto con otro problema.

El primer artículo llamado “*The storage location assignment and interleaving problem in an automated storage retrieval system with shared storage*” por Chen et al. (2010). Trabaja el problema de asignación de ubicaciones e intercalación (*LAIP*) en un AS/RS de carga unitaria con múltiples pasillos con una política de almacenamiento compartida basada en duración de estadia (*Duration of stay*) o (*DOS*) y ciclo de doble comando (*DCC*) con el objetivo de minimizar el tiempo medio de desplazamiento de las maquinas S/R para procesar una operación, para esto

desarrollan un procedimiento en dos pasos para resolver el problema y proponen un algoritmo tabú para mejorar las soluciones en iteraciones de tamaño mediano y grande, este método no solo debe proporcionar ubicaciones de almacenamiento si no también secuencias de intercalación de los procesos de las maquinas S/R. El sistema está compuesto por varios pasillos, cada pasillo con una estación I/O para cargas entrantes y salientes y cada uno con una maquina S/R dedicada y suponen que el tiempo para recoger o depositar es independiente de la secuencia de las peticiones, el tiempo de disponibilidad de la maquina S/R es infinito y las maquinas S/R funcionan en modo de ciclo de doble comando, pero también pueden funcionar en ciclo de único comando (*SCC*). Durante la experimentación se comparó el modelo DCC con el modelo SCC usado por otro autor, como resultado se obtuvo que el uso de DCC en promedio mejora significativamente los tiempos de transporte, y entre más grande el problema es mejor, también encontraron que el método de la heurística de construcción funciona bien para problemas de tamaño pequeño y para problemas de tamaño mediano y grande el TS mejora los tiempos de transporte entre 0,4% y 2%.

A continuación, el artículo “*Defining order picking policy A storage assignment model and a simulated annealing solution in AS-RS systems*” por Atmaca & Ozturk (2013). En el que se tratan los problemas de distribución y asignación de almacenamiento para minimizar los costos de almacenamiento en un AS/RS con una política de preparación de pedidos, para esto proponen un modelo entero mixto y una metaheurística de recocido simulado (*SA*). Para el sistema asumieron que se conoce el requisito de ubicación de almacenamiento de cada material, existen dos puntos I/O, se conoce la distancia entre estos puntos y las ubicaciones, y cada ubicación de almacén tiene la misma proporción. En la experimentación se compararon el modelo entero mixto y la metaheurística SA, obtuvieron que el modelo entero mixto solo puede encontrar soluciones optimas si el problema es pequeño, si es mediano o grande no tiene suficiente tiempo para

encontrar la solución, mientras que el SA da soluciones cercanas a las óptimas y es capaz de manejar problemas más grandes en un tiempo computacional bueno.

En el siguiente proyecto “*Storage Assignment Optimization in a Multi-tier Shuttle Warehousing System*” por Wang et al. (2016). Donde resuelven el problema de asignación de almacenamiento en un sistema AS/RS de lanzaderas de varios niveles en función de la correlación de las unidades de mantenimiento de existencias (*SKU*) para minimizar la distancia total del movimiento y los tiempos operacionales, diseñan un algoritmo de agrupación en colonias de hormigas para determinar las particiones de almacenamiento mediante la agrupación de artículos. El algoritmo propuesto se resuelve basándose en la capacidad de la colonia de hormigas para determinar el camino óptimo a la fuente de alimento, aplica un sistema de control de retroalimentación positiva obteniendo resultados con alta robustez. En la experimentación, se basaron en un caso de un proyecto de ingeniería aplicado en la industria del tabaco, comparado con los resultados de este proyecto, el algoritmo propuesto consigue mejores soluciones.

Continuamos con el trabajo llamado “*Integrated optimization of location assignment and sequencing in multi-shuttle automated storage and retrieval systems under modified 2n-command cycle*” por P. Yang et al. (2017). Que se enfoca en el problema de asignación y secuenciación de la maquina S/R en conjunto en un AS/RS con lanzaderas múltiples con doble ciclo de comando, con el objetivo de maximizar el desempeño del sistema, considerando la calidad de las soluciones y el tiempo computacional para obtenerlas, para esto se propuso resolver las instancias de tamaño pequeño con CPLEX y para problemas de tamaño mayor se desarrolló un algoritmo de búsqueda tabú junto con primero en llegar, primero en salir (*FCFS+TS*) y otro algoritmo de búsqueda tabú junto con el vecino más cercano (*NN+TS*). El sistema supone que las ubicaciones de asignación son del mismo tamaño, el punto de I/O está situado en la esquina izquierda inferior, el S/R se

desplaza tanto horizontal como verticalmente en simultaneo a una velocidad constante y las colas en S/R y las ubicaciones son conocidas. En los resultados muestran que los algoritmos propuestos obtienen soluciones cercanas a las óptimas y las soluciones obtenidas por NN+TS tienen una diferencia de tan solo 4,4% a la solución óptima del CPLEX, además de que las soluciones de los algoritmos son mucho más eficientes con el tiempo computacional.

Ademas se encontró el siguiente proyecto titulado “*Integrated Optimization of Mixed Cargo Packing and Cargo Location Assignment in Automated Storage and Retrieval Systems*” por Lei et al. (2019). En este caso se integra el problema de asignación con el problema del embalaje de cargase en un AS/RS apilador que solo tiene un vehículo y cada ubicación solo puede almacenar un contenedor de carga con el objetivo de minimizar el tiempo de salida de los apiladores, para esto diseñaron un algoritmo genético hibrido mejorado (IHGA). El sistema consta de varios carriles, cada uno de los cuales es relativamente independiente, con apiladores separados y accesos de I/O, el número de cada variedad de mercancías durante cada entrega entrante es inferior a la capacidad máxima de almacenamiento de esta variedad de mercancías en una ubicación, las mercancías se reponen a tiempo, sin que falten mercancías en el momento de la entrega de salida, y la entrada y salida para la entrega de la carga se encuentra en el primer piso en el lado izquierdo. En la experimentación se compara el algoritmo propuesto con otras dos Heurísticas, y se obtiene como resultado que el IHGA genera mejores resultados en calidad y tiempo computacional.

Para finalizar, el último artículo de esta sección revisado se titula “*Multiple-Rack Strategies Using Optimization of Location Assignment Based on MRCGA in Miniload Automated Storage and Retrieval System*” por He et al (2023). Que busca presentar estrategias de estanterías múltiples en miniload AS/RSs, que incluye los métodos de asignación de primer ajuste (FF) y mejor ajuste (BF) basados en un algoritmo genético de codificación real matricial (MRCGA), con el objetivo

de reducir fragmentación y aumentar la capacidad de los racks. El modelo asume un diseño de estantería y apilado de una sola profundidad, las estanterías tienen la misma longitud, altura y profundidad, y los cotos de tiempo en la preparación del S/R se manejan como constantes. En los experimentos analizaron tres estrategias de estanterías, que los objetos tuvieron la misma probabilidad, o la ley de 80/20, comparando su capacidad y la utilización del espacio, propusieron los métodos FF y BF para localizar los objetos y utilizaron el MRCGA para generar la solución óptima, y los resultados muestran que el método BF tienen mayores ventajas que el FF, consiguiendo una utilización del espacio 20% mayor.

En el contexto del problema de asignación de almacenamiento, se presenta un caso que compara diversas metaheurísticas. En el cuarto artículo, en el quinto párrafo, se examinan tres enfoques: el algoritmo tabú combinado con la heurística Primero en Llegar, Primero en Ser Atendido (TS-FCFS), el algoritmo tabú combinado con el Vecino Más Cercano (TS-NN). Los resultados indican que la combinación TS-NN supera a las demás, lo cual puede atribuirse a que el enfoque del Vecino Más Cercano es más adaptativo, permitiendo una mayor flexibilidad en la asignación de almacenamiento al evaluar constantemente la mejor opción disponible. Sin embargo, en cuanto a la aplicabilidad de estos estudios, es importante señalar que el primer artículo asume un tiempo de disponibilidad infinito para la máquina de almacenamiento y recuperación (S/R), lo que podría limitar su relevancia en situaciones prácticas.

A continuación, se presenta la tabla 12 con un resumen de la subsección de los estudios con el problema de asignación de almacenamiento.

Tabla 12.

Resumen de los estudios clasificados que usaron el problema de asignación de almacenamiento.

Problema de asignación de almacenamiento				
Título	AS/RS	Metaheurística/s	Objetivo de decisión	Resultados
The storage location assignment and interleaving problem in an automated storage retrieval system with shared storage	AS/RS de carga unitaria con múltiples pasillos	Algoritmo tabú y una heurística	Minimizar el tiempo medio de desplazamiento o del S/R	la heurística de construcción funciona bien para problemas de tamaño pequeño y para problemas de tamaño mediano y grande el TS se desempeña mucho mejor
Defining order picking policy A storage assignment model and a simulated annealing solution in AS-RS systems	AS/RS tradicional	Modelo entero mixto y recocido simulado	Minimizar los costos de almacenamiento	SA da soluciones cercanas a las óptimas y es capaz de manejar problemas más grandes en un tiempo computacional bueno.
Storage Assignment Optimization in a Multi-tier Shuttle Warehousing System	AS/RS de lanzaderas de varios niveles	Algoritmo de agrupación de colonias de hormigas	Minimizar la distancia total del movimiento y los tiempos operacionales	se basaron en un caso de un proyecto de ingeniería aplicado en la industria del tabaco, comparado con los resultados de este proyecto, el algoritmo propuesto consigue mejores soluciones.
Integrated optimization of location assignment and sequencing in multi-shuttle automated storage and retrieval systems under modified 2n-command cycle	AS/RS de lanzaderas múltiples	algoritmo de búsqueda tabú junto con primero en llegar, primero en salir (FCFS+TS) y otro algoritmo de búsqueda tabú junto con el vecino más cercano (NN+TS).	Maximizar el desempeño del sistema	los algoritmos propuestos obtienen soluciones cercanas a las óptimas y las soluciones obtenidas por NN+TS tienen una diferencia de tan solo 4,4% a la solución óptima del CPLEX, además de que las soluciones de los algoritmos son mucho más eficientes con el tiempo computacional.
Integrated Optimization of Mixed Cargo Packing and Cargo Location Assignment in Automated Storage and Retrieval Systems	AS/RS apilador que solo tiene un vehículo	Algoritmo genético híbrido mejorado	Minimizar el tiempo de salida de los apiladores	el IHGA genera mejores resultados en calidad y tiempo computacional
Multiple-Rack Strategies Using Optimization of Location Assignment Based on MRCGA in Miniloader Automated Storage and Retrieval System	Miniloader AS/RS	asignación de primer ajuste (FF) y mejor ajuste (BF) basados en un algoritmo genético de codificación real matricial (MRCGA)	reducir fragmentación y aumentar la capacidad de los racks	el método BF tienen mayores ventajas que el FF, consiguiendo una utilización del espacio 20% mayor

7.5. Problema de diseño de AS/RS

En esta sección se revisarán proyectos que proponen diseños de AS/RS en donde el principal objetivo es satisfacer las necesidades de almacenamiento, sujetas a limitaciones operativas y físicas, y teniendo en consideración los objetivos de optimización propuestos.

El primer diseño lo realizan en el trabajo llamado “*An innovative automated storage and retrieval system for B2C e-commerce logistics*” por Hu & Chang (2010). En donde para solucionar el desafío del funcionamiento eficiente y flexible para la gestión de pedidos en línea, proponen un nuevo AS/RS con capacidad para cruzar pasillos y realizar movimientos en 3D, el AS/RS propuesto usa el algoritmo de sistema de colonias de hormigas (ACS) para organizar una ruta de recogida casi óptimas para un nuevo dispositivo propuesto en el nuevo sistema llamado transporte multinivel de acceso automático (IMCD), el cual es una instalación de manipulación de material sin obstrucciones a nivel transversal y de acceso automático que incluye un dispositivo de traslación con una base entre pasillos, un dispositivo de accionamiento, fijado a la base, que permite el movimiento a lo largo de los rieles, un aparato de sujeción para mantener fijo el artículo a transportar y un elevador. Los resultados de los experimentos en donde compararon el AS/RS propuesto con un sistema típico, demuestran que el modelo propuesto es adecuado para casos con grandes listas de selección y alta densidad de órdenes, completando tareas con mayor efectividad.

A continuación, el artículo “*Designing Unit Load Automated Storage and Retrieval Systems*” por Lerher & Šraml (2012). En el que proponen el diseño y la optimización del AS/RS de carga unitaria, con el que desarrollan soluciones óptimas para la minimización del coste total del sistema, el objetivo es usar el algoritmo genético (GA) para crear el diseño más económico de la unidad de carga AS/RS. El modelo para el diseño del sistema tiene en cuenta la planificación de la distribución del almacén, la planificación del equipamiento del almacén, la consideración

económica, la modelización de la función objetivo y la optimización del sistema, primero realizan un análisis de datos para fijar capacidad de almacén, y preparar la información que se usara para determinar los niveles de inventario, los equipos de almacenamiento y manipulación de productos, luego se realizara la planificación de la distribución y de equipos del almacén y finalmente tendrá en cuenta el peso económico del taller, como costos de la tierra, de construcción, equipamiento, etc. Para la experimentación, desarrollaron modelos en dos sistemas, el AS/RS propuesto con un solo pasillo y el AS/RS propuesto, pero con pasillos múltiples, y los resultados indicaron que el modelo para mejorar la eficiencia de los costes para ambos tipos de sistemas se consigue con estanterías de almacenamiento más altas y largas.

En el siguiente proyecto titulado “*Multi-shuttle AS/RS dimensions optimization using a genetic Algorithm case of the multi-aisle configuration*” por Fandi et al. (2022). También manejan un algoritmo genético esta vez con la intención de determinar las dimensiones óptimas del AS/RS con el objetivo de minimizar el tiempo de multi ciclo de los AS/RS de múltiples pasillos y lanzaderas. En este caso para trabajar el modelo los autores asumieron que la maquina S/R puede moverse horizontal y verticalmente de manera simultánea, la probabilidad de acceso a cualquier ubicación del sistema es la misma y la metodología de almacenamiento y recuperación es aleatoria y el punto I/O está ubicado en la esquina inferior izquierda. Para los experimentos, realizaron dos casos, uno en el que las operaciones de almacenamiento y recuperación se realizan en el mismo pasillo y el otro en pasillos diferentes, los resultados lograron encontrar las dimensiones más cercanas a las óptimas en ambos casos.

El último trabajo de este problema que se revisa tiene como título “*A multi-objective optimization model for minimizing investment expenses, cycle times and CO2 footprint of an automated storage and retrieval systems*” por Rajković et al. (2019). En este caso proponen un

modelo que ayuda a diseñadores de almacenes en las primeras fases de planeación a probar diferentes configuraciones que podrían funcionar en sus diseños, por lo tanto, se analiza en un sistema AS/RS común, pero tiene como objetivo minimizar gastos de inversión, tiempo de ciclo, y huella de emisiones de carbono simultáneamente, para esto proponen un algoritmo genético de ordenación no dominante II (*NSGAI*). Para la modelación y la experimentación los autores asumieron que el edificio del almacén se divide en segmentos, que contienen pasillos con S/R en ambos lados, solo hay un tipo de dispositivo de manipulación de materiales (*MHD*), puede haber una cantidad de *MHD* solo tanto o menos de lo que hay pasillos, el *MHD* puede cambiar de pasillos, y realiza tanto *SCC* como *DCC*. Los resultados muestran que si se quiere un mejor rendimiento de la maquina S/R usualmente significa menor eficiencia energética y un mayor coste de inversión, por lo tanto, los diseñadores pueden decidir si quieren lograr mejor desempeño y más gasto energético o, al contrario.

En el problema de diseño de AS/RS, no se encontraron casos que compararan metaheurísticas ni combinaciones entre ellas. Sin embargo, el último artículo presentado ofrece un enfoque interesante, en el cual permite al diseñador elegir entre priorizar un mejor rendimiento, mayor eficiencia energética o un menor costo de inversión, mostrando cómo los cambios en una variable afectan las demás. Esto incrementa la aplicabilidad del diseño. Además, en el segundo artículo, se abordan aspectos como la planificación de la distribución del almacén, el equipamiento, las consideraciones económicas, la modelización de la función objetivo y la optimización del sistema, lo que también contribuye a mejorar su aplicabilidad.

A continuación, se presenta la tabla 13 con un resumen de la subsección de los estudios con el problema de diseño de AS/RS.

Tabla 13.

Resumen de los estudios clasificados que usaron el problema de diseño de AS/RS

Problema de diseño de AS/RS				
Título	AS/RS	Metaheurística/s	Objetivo de decisión	Resultados
An innovative automated storage and retrieval system for B2C e-commerce logistics	AS/RS con capacidad para cruzar pasillos y realizar movimientos en 3D	Algoritmo de sistema de colonias de hormigas	organizar una ruta de recogida casi óptimas para un nuevo dispositivo propuesto en el nuevo sistema llamado transporte multinivel de acceso automático (IMCD)	el modelo propuesto es adecuado para casos con grandes listas de selección y alta densidad de órdenes, completando tareas con mayor efectividad.
Designing Unit Load Automated Storage and Retrieval Systems	AS/RS de carga unitaria	Algoritmo genético	Minimización del coste total del sistema	el modelo para mejorar la eficiencia de los costes para ambos tipos de sistemas se consigue con estanterías de almacenamiento más altas y largas.
Multi-shuttle AS/RS dimensions optimization using a genetic Algorithm case of the multi-aisle configuration	AS/RS de múltiples pasillos y lanzaderas	Algoritmo genético	Minimizar el tiempo de multi ciclo	realizaron dos casos, uno en el que las operaciones de almacenamiento y recuperación se realizan en el mismo pasillo y el otro en pasillos diferentes, los resultados lograron encontrar las dimensiones más cercanas a las óptimas en ambos casos.
A multi-objective optimization model for minimizing investment expenses, cycle times and CO2 footprint of an automated storage and retrieval systems	AS/RS tradicional	algoritmo genético de ordenación no dominante II	minimizar gastos de inversión, tiempo de ciclo, y huella de emisiones de carbono simultáneamente	un mejor rendimiento de la maquina S/R usualmente significa menor eficiencia energética y un mayor coste de inversión, por lo tanto, los diseñadores pueden decidir si quieren lograr mejor desempeño y más gasto energético o, al contrario.

7.6. Otros problemas de optimización

En esta sección de la clasificación se ubican problemas de optimización que solo fueron trabajados por un proyecto. Se revisará el problema de la planificación de trayectorias (*Path planning problem*) que se define como el problema de formular una trayectoria para que siga el vehículo de principio a fin, bajo unas restricciones y con objetivos de optimización (Mohammad

El-Basioni & Abd El-Kader, 2023), problema de reorganización del almacén (*Warehouse reshuffling problem*), que consiste en reordenar los palets de un almacén desde su ubicación inicial a la deseada con la mayor rapidez posible (Buckow & Knust, 2023a), problema de optimización de la reubicación de artículos (*Optimization problem of item relocation*) que busca encontrar la secuencia más corta de movimientos para recuperar los artículos en el orden de salida dado (Lersteau & Shen, 2022). También está un proyecto que presenta el uso de Metaheurísticas para aplicar control a un AS/RS de estanterías dinámicas y finalmente un artículo que introduce estrategias de estanterías múltiples en AS/RS.

El primer artículo encontrado se titula “*A tabu search algorithm for the relocation problem in a warehousing system*” por Chen et al. (2011). Que aborda el problema de reubicación de artículos en un AS/RS dinámico que funciona en modo de comando único con doble objetivo de minimizar el tiempo total de reubicación y satisfacer la disponibilidad de tiempo de las máquinas para las operaciones de manipulación, para esto proponen una heurística en dos fases como solución inicial y después proponen un algoritmo tabú para mejorar esta solución, la idea del modelo es que aquellos materiales que deban almacenarse o recuperarse en los periodos más ocupados, puedan ir siendo reubicados más cerca del punto I/O. El sistema tiene en cuenta que las solicitudes de S/R que incluyen artículos y sus cantidades ya son conocidas, todos los artículos se trasladan en cargas unitarias, y no se tiene en cuenta las ubicaciones múltiples de un objeto. En la experimentación se usó el modelo CPLEX para obtener la solución óptima en problemas de tamaño pequeño y mediano y se comparó, con el método de dos fases de Heurísticas y después con el de búsqueda tabú, se obtuvo que los resultados dados con el algoritmo propuesto más TS dan soluciones más cercanas a las óptimas, manteniendo un tiempo computacional bueno, y en el caso de problemas de tamaño grandes solo usaron el TS.

A continuación “*Path Planning of AS/RS Based on Cost Matrix and Improved Greedy Algorithm*” por D. Li et al. (2021). Abarca el problema de planificación de rutas en un AS/RS, proponen un algoritmo codicioso basado en la matriz de costos para minimizar los costos del sistema y el tiempo total que tarda el apilador en completar una serie de tareas. El modelo asume que el apilador solo puede ocuparse de una tarea a la vez, el apilador se mueve a una velocidad constante ya sea vertical o horizontal, y se ignora el tiempo de almacenaje y recuperación. Durante la experimentación, se comparó un algoritmo exhaustivo, un algoritmo de retroceso, un algoritmo genético y el algoritmo codicioso y como resultado de las simulaciones se obtiene que el algoritmo codicioso tarda menos que el 1% de lo que tarda el algoritmo de retroceso y tarda el 50% de lo que tarda GA, por lo tanto, comprobaron que el algoritmo propuesto es más efectivo.

Además, se encontró el proyecto “*The warehouse reshuffling problem with swap moves and time limit*” por Buckow & Knust (2023b). En el que trabajan el problema de la reorganización de almacenes (*WRP*) en un almacén de estanterías altas con un AS/RS, el objetivo es minimizar costos moviendo los pales con altos índices de rotación más cerca del punto de entrada y salida (*I/O*). Para esto proponen dos modelos que comprobaran que el problema es NP-Hard, además de la metaheurística recocido simulado para encontrar soluciones factibles. El sistema está equipado con un transelevador de doble lanzadera que está diseñado para realizar movimientos de intercambio, además tienen en cuenta que el tiempo de reorganización es limitado y la asignación deseada de los pales no se sabe con anterioridad. Los resultados de la experimentación indican que, entre más pequeño el almacén o el tiempo de reorganización, más complicado se vuelve el problema, también comprobaron NP-hard y el algoritmo SA propuesto consigue soluciones factibles al problema.

Se presenta la tabla 14 con el resumen de la clasificación otros problemas.

Tabla 14.

Resumen de los estudios clasificados en otros problemas de optimización.

Otros problemas de optimización					
Título	Problema	AS/RS	Metaheurística/s	Objetivo de decisión	Resultados
A tabu search algorithm for the relocation problem in a warehousing system	problema de reubicación de artículos	AS/RS dinámico	heurística en dos fases como solución inicial y después proponen un algoritmo tabú para mejorar esta solución	minimizar el tiempo total de reubicación y satisfacer la disponibilidad de tiempo de las máquinas	TS dan soluciones más cercanas a las óptimas, manteniendo un tiempo computacional bueno, y en el caso de problemas de tamaño grandes solo usaron el TS.
Path Planning of AS/RS Based on Cost Matrix and Improved Greedy Algorithm	problema de planificación de rutas	AS/RS tradicional	algoritmo exhaustivo, un algoritmo de retroceso, un algoritmo genético y el algoritmo codicioso	minimizar los costos del sistema y el tiempo total	el algoritmo codicioso tarda menos que el 1% de lo que tarda el algoritmo de retroceso y tarda el 50% de lo que tarda GA, por lo tanto, comprobaron que el algoritmo propuesto es más efectivo.
The warehouse reshuffling problem with swap moves and time limit	problema de la reorganización de almacenes	almacén de estanterías altas con un AS/RS	recocido simulado	Minimizar costos	entre más pequeño el almacén o el tiempo de reorganización, más complicado se vuelve el problema y el algoritmo SA propuesto consigue soluciones factibles al problema.

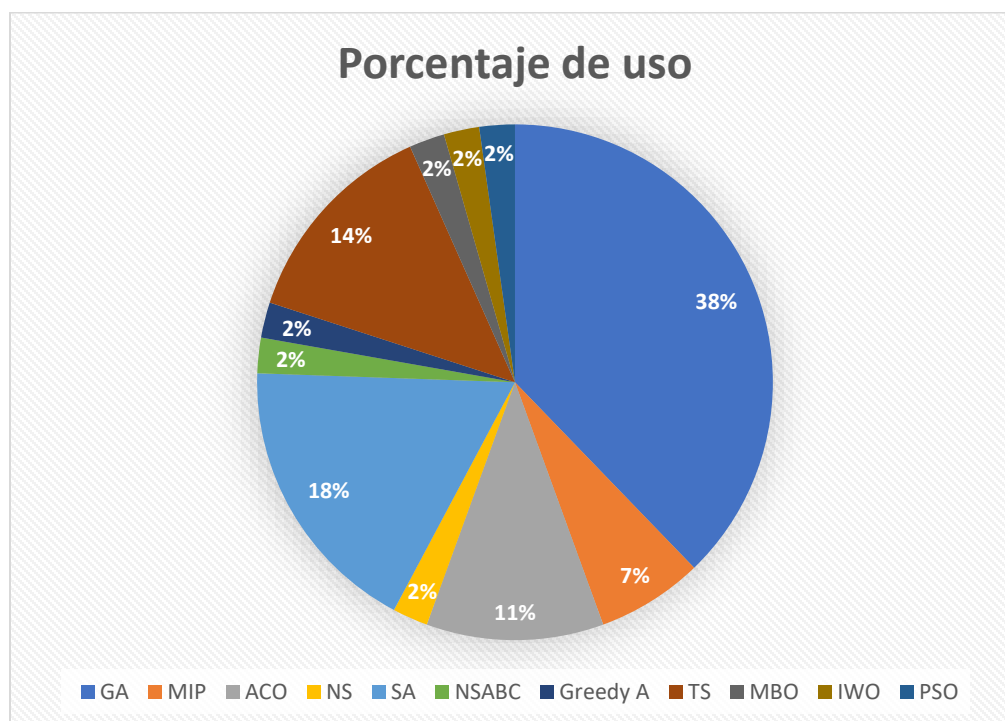
7. Discusión

Las Metaheurísticas son uno de los enfoques principales en el uso de AS/RS, por la dificultad de los problemas de optimización en estos y los tiempos en los que se necesita llegar a una solución. Durante la revisión de artículos referentes a este tema, se pudo evidenciar una evolución en los modelos usados en el tiempo, los proyectos realizados entre 2010 y 2014 los usaban en su forma básica y solo aplicaban uno, después del 2014 hasta el presente año iniciaron a emplear modelos más complicados, ya sean nuevos algoritmos como el algoritmo de optimización de ballenas (*WOA*), modificaciones a estos como el algoritmo genético de ordenación

no dominante II (*NSGAI*) o combinaciones entre modelos para tomar las mejores partes de estos como el algoritmo genético combinado con optimización de aves migratorias (*GA-MBO*). Ahora la cantidad de uso de estas Metaheurísticas es importante, ya que puede ayudar a indicar cuales son los algoritmos con más confianza, o con los que se pueden trabajar si se busca realizar una investigación no explorada con anterioridad, en el margen de este proyecto se realizó la figura 6, que muestra el porcentaje de uso de las Metaheurísticas por los trabajos considerados.

Figura 7.

Porcentaje de uso de las Metaheurísticas



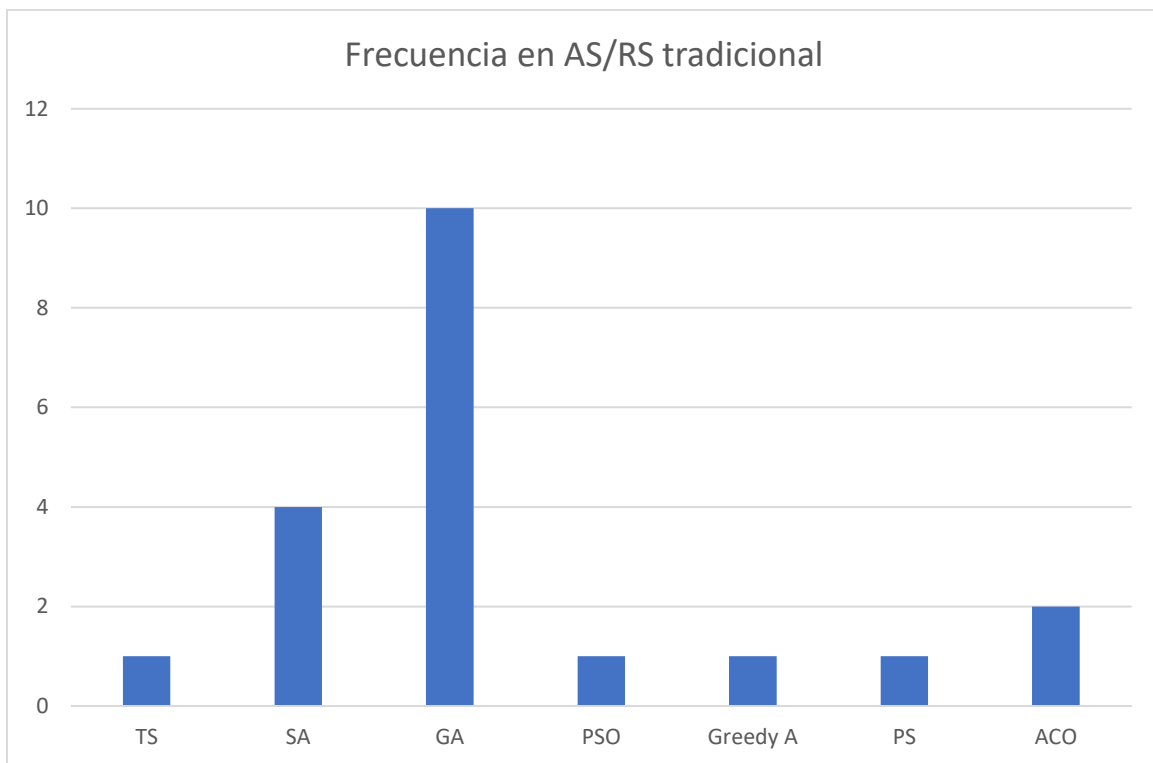
En base a este gráfico resalta un alto uso de la metaheurística de algoritmo genético y sus variaciones con un 38% en comparación a otros, también se denota un uso alto del algoritmo de recocido simulado, búsqueda tabú y optimización de colonia de hormigas, la presencia de estas cuatro estrategias podría explicarse en gran parte a la antigüedad de estas, por lo tanto, existiría

una preferencia basada en la confianza y estudios realizados, aun así, definitivamente se puede ver un cambio en los últimos años que indicaría el uso de combinaciones y nuevos modelos a futuro.

A continuación, se presentará la frecuencia de uso de Metaheurísticas por tipo de AS/RS, problema de optimización y objetivo de decisión, para definir la preferencia por variable que afectan los modelos.

Figura 8.

Frecuencia de Metaheurísticas en AS/RS tradicional

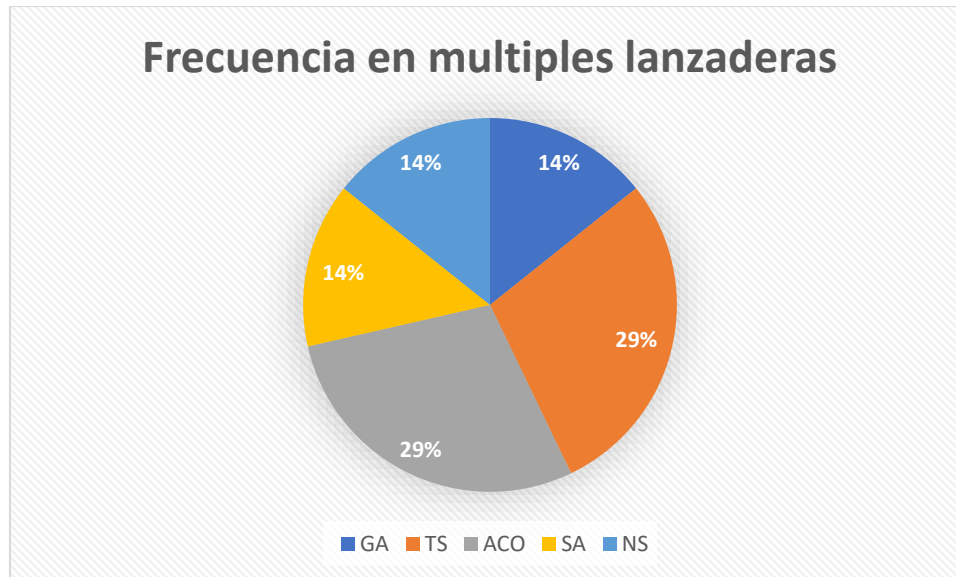


En la figura 7 se presenta la frecuencia de las Metaheurísticas en los AS/RS tradicionales, recalca el alto uso del algoritmo genético (GA) y sus variaciones en este tipo de sistemas abarcando el 50% de empleo en estos casos. Además, se nota un buen uso del algoritmo recocido simulado (SA) y optimización por colonia de hormigas. Esto puede ser debido a que se está trabajando en el

sistema más simple y más investigado, por lo tanto, GA y SA al ser antiguos mantiene más presencia.

Figura 9.

Frecuencia de Metaheurísticas en AS/RS de múltiples lanzaderas.

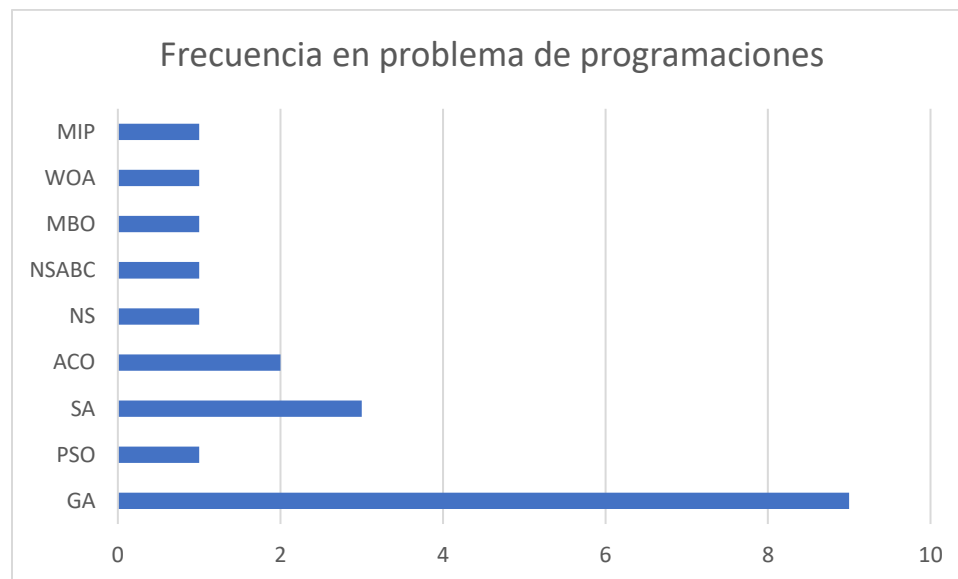


Ahora la Figura 8 muestra la frecuencia de uso de Metaheurísticas en AS/RS de múltiples lanzaderas, y en este caso podemos ver que se encuentra más balanceado, pero con el algoritmo tabú (TS) y la optimización de colonia de hormigas (ACO) con el mayor porcentaje de uso en un 29%, mientras que SA, NS y GA obtuvieron un porcentaje de uso del 14%. A continuación, los proyectos que tenían en cuenta un almacén con AS/RS, se encontró el uso de GA en dos oportunidades, TS y MBO en una oportunidad. Para los artículos que manejaban sistemas de doble profundidad, se evidencio el uso de SA y del algoritmo de optimización de ballenas (WOA). En el caso de modelos con múltiples pasillos usaron GA y algoritmo artificial de colonia de abejas con clasificación no dominante (NSABC), en AS/RS con estanterías dinámicas TS y SA. El AS/RS de plataforma dividida (SP AS/RS), miniload y sistemas con módulos verticales usaron GA. Para

ascensores de capacidad múltiple en sistemas de almacenamiento y recuperación basados en lanzaderas de pasillo único con capacidad para varios niveles (SBS/RS) utilizaron un modelo mixto de programación lineal entera (MIP) y TS. En AS/RS con dos depósitos también prefirieron MIP y GA. Y finalmente en un sistema de múltiples entradas/salidas (I/O) usaron optimización de colonia de hormigas (ACO).

Figura 10.

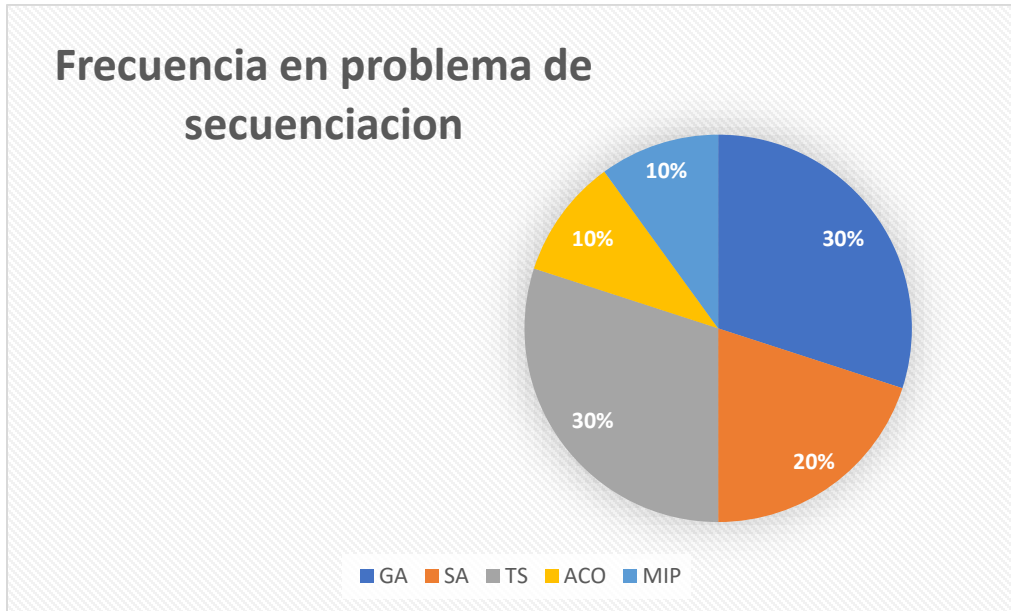
Frecuencia de Metaheurísticas en el problema de programación



En la figura 9 se presenta la frecuencia de uso de Metaheurísticas en el problema de programación, en donde nuevamente podemos ver que el algoritmo genético recibe la mayor cantidad de usos con el 45%, después el algoritmo de recocido simulado con un 15% y optimización de colonia de hormigas con 10%, cabe notar que nuevamente estos tres algoritmos vuelven a ser los tres más usados como en el caso de los AS/RS tradicionales. Además, los cuatro proyectos que trabajaron con estos sistemas para resolver el problema de programación optaron por usar GA, esto puede indicar que en estos casos el algoritmo genético se desempeña mejor.

Figura 11.

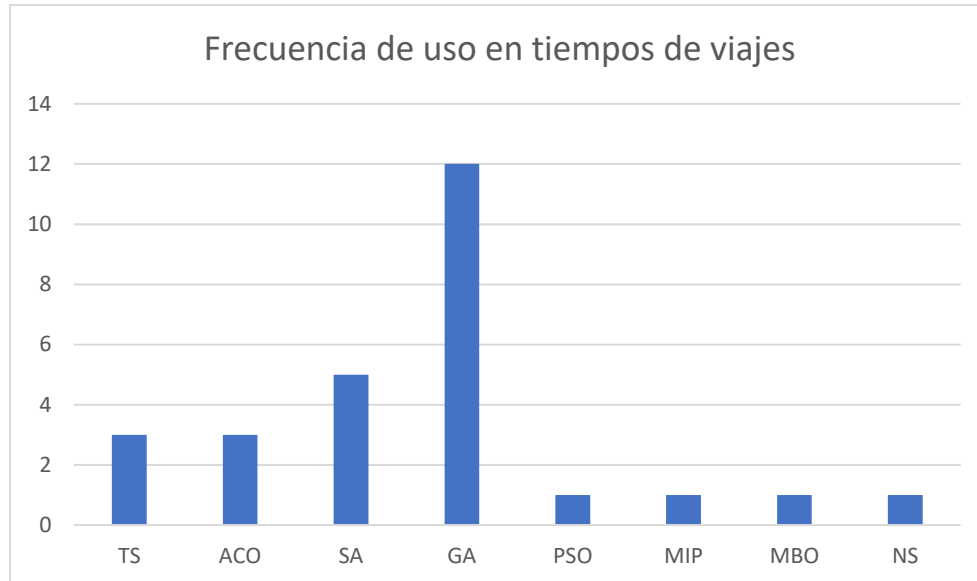
Frecuencia de Metaheurísticas en el problema de secuenciación



En la figura 10 se expone la frecuencia de uso de metaheurísticas en el problema de secuenciación, la mayor presencia es del 30% por el algoritmo tabú y el algoritmo genético, luego el recocido simulado, ACO y MIP. En este caso también hacen uso del algoritmo genético en todas las instancias que se trabaja el problema en un AS/RS tradicional, que podrían indicar mejor desempeño en esta combinación, mientras que el uso del algoritmo tabú no se relaciona a ninguna combinación específica entre sistema y el problema de la secuenciación. Mientras que, para el problema de dosificación emplearon el algoritmo de recocido simulado (SA) y un modelo mixto de programación lineal entera (MIP). Ahora en el caso del problema de localización se evidencia un mayor uso del algoritmo tabú en tres ocasiones, GA en dos ocasiones, SA y ACO en una ocasión. Para el problema de diseño se encontró el uso de GA en 3 casos y ACO en dos, y finalmente para el problema de planeación de camino usaron el algoritmo codicioso y SA para el problema de reorganización.

Figura 12.

Frecuencia de metaheurísticas en la minimización de tiempos de viaje



Para finalizar el análisis de frecuencia de metaheurísticas se presenta la figura 11 de frecuencia de uso de Metaheurísticas en el objetivo de minimización de tiempos de viaje, que nos muestra una presencia del 44% de GA, 19% de SA, 11% de TS y ACO, en este caso el problema de programación y secuenciación con este objetivo de optimización abarca la mayoría de empleo del algoritmo genético, indicando que en estas combinaciones puede ser preferible el uso de este algoritmo. Ahora, para la minimización de costos SA y GA se presentan en 3 y 2 casos respectivamente, para minimizar demoras GA y NSABC son los dos algoritmos utilizados, para la minimización del tiempo total de producción y las distancias de viaje optaban por ACO y GA. Cuando el objetivo era obtener tiempos computacionales menores usaron búsqueda tabú (TS) y el algoritmo codicioso, en la ocasión que buscaban minimizar el tiempo de relocalización se usó TS, y finalmente cuando se realizaba un modelo con la intención de minimizar el consumo de energía

y reducir las emisiones de carbono usaron el algoritmo de optimización de ballenas (WOA), MIP, TS y GA.

Ahora siguiendo la misma línea de ideas, aunque no se ha visto una variación a través de los años de los problemas trabajados y todos estos problemas de optimización de los proyectos se distribuyen en los años, en los últimos años se evidencia un interés en realizar los modelos con múltiples objetivos de decisión simultáneamente, además, se ve un cambio en los objetivos propuestos por los autores, el punto principal de decisión sigue siendo en la mayoría de los casos, una minimización de tiempos, mayor efectividad o reducción de costos. Que es de esperarse, ya que claramente el objetivo de las empresas es vender su producto y para esto mayor efectividad en sus ciclos de operación en los almacenes es clave, aun así, se revisaron proyectos que se enfocan en reducir la huella de carbono de la operación, o reducir costos asociados al gasto de energía del sistema, esto demuestra un interés en integrar un poco problemas más sociales como lo es el calentamiento global y el desperdicio energético, otros proyectos llamaron la atención, ya que realizaron el modelo de manera que se pudiera decidir si se prefería aumentar los costos del gasto de energía o mejorar el tiempo de recorrido de la lanzadera, que aumentaría la eficiencia del sistema, permitiendo esa flexibilidad a los usuarios.

También cabe notar que la elección de la metaheurística va a depender de las ventajas y desventajas que estas traigan gracias a su estructura, como en GA, que tiene una buena exploración global gracias a sus pasos de cruce y mutación que cubren muchas posibilidades de respuesta, por lo tanto, usualmente generan los mejores resultados en cuanto al objetivo de decisión, a cambio de un tiempo computacional elevado en comparación a otras. Después recocido simulado es eficiente en la búsqueda local en la asignación de espacios y es simple de implementar, mientras que posee una menor capacidad para explorar varias soluciones debido al paso de enfriamiento gradual. En

el caso de búsqueda tabú es buena evitando ciclos repetitivos en los sistemas de almacenamiento gracias a la lista tabú, pero es costosa en términos de memoria y tiempos computacionales. Y finalmente la optimización por colonia de hormigas, con las feromonas que permiten mejorar soluciones y su búsqueda basada en probabilidades la hace eficiente en los problemas de secuenciación de pedidos y optimización de rutas, a cambio, de una eficiencia computacional baja sobre todo en almacenes de gran tamaño.

Finalmente, en el marco de los proyectos revisados, se encontraron tres pares de proyectos con los mismos autores, se observa que en estos casos manejan modelos muy parecidos, usando los mismos sistemas AS/RS, y la misma metaheurística, realizando cambios con el problema de optimización, políticas u objetivos de decisión.

8. Conclusiones

Los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS) son el futuro de la logística en las empresas, por lo tanto, el entendimiento de sus componentes es muy importante, el estudio de los problemas de optimización permite a las partes interesadas en usar estos sistemas o continuar estudiándolos a evaluar, analizar, decidir en base a estos.

Por lo tanto, en este proyecto se clasificaron artículos que investigan el uso de Metaheurísticas para solucionar diferentes problemas de optimización en AS/RS, esta clasificación permite al lector identificar primero el problema que se está buscando, para luego presentar el título del proyecto, autor, año, metaheurística, sistema AS/RS, objetivos de decisión, asunciones en el modelo, y finalmente los resultados que obtuvieron. Además de esto se realizó un análisis del uso de las metaheurísticas, y los tipos de problemas trabajados.

En conclusión, durante la investigación y análisis no se observó una relación específica entre los problemas de optimización y algún algoritmo metaheurístico en particular. Esto se refleja en que varias metaheurísticas lograban obtener buenos resultados para el mismo problema.

También se observó que la aplicabilidad de algunos estudios varía. Esto depende de la cantidad de factores o problemas que se consideren en función del objetivo de decisión que guíe el diseño. Además, la relevancia se ve afectada por las suposiciones que hagan los autores, como ignorar posibles paros o fallas, lo cual es poco realista y puede reducir significativamente la aplicabilidad de los resultados.

Asimismo, se destaca que el algoritmo genético (GA) y sus variantes se presenta y es relevante para todos los problemas estudiados con un 38% de presencia, lo que refuerza su importancia teórica como método de optimización debido a su robustez y eficiencia. Lo que indica que en general el GA es la técnica más utilizada para abordar problemas de optimización en AS/RS.

Por otro lado, en los últimos años se ha observado un aumento en el uso de algoritmos alternativos a los clásicos, combinaciones entre ellos. El objetivo de estas técnicas es obtener mejores resultados en menores tiempos e incorporar más elementos del sistema al problema de optimización, y poder soportar su complejidad. Sin embargo, estos implican una complejidad computacional más alta que significaría costos más altos para la empresa que los quiera incluir, lo que hace los algoritmos tradicionales, como el GA, SA y TS, sigan siendo una opción viable que se demuestra en su constante uso en estudios recientes en la literatura.

Por último, los estudios muestran que las metaheurísticas combinadas ofrecen mejores resultados y mayor eficiencia computacional. En última instancia, corresponde a los diseñadores o tomadores de decisiones evaluar si el beneficio justifica la inversión. También es importante

destacar que la elección de la metaheurística dependerá de las ventajas específicas que ofrece cada una según el contexto del problema y de los objetivos de mejora que tenga la planta.

9. Recomendaciones

Se recomienda realizar investigaciones con las metaheurísticas algoritmo de optimización de ballenas (WOA), optimización de aves migratorias (MBO), búsqueda de vecino (NS), colonia artificial de abejas (ABC), el algoritmo codicioso (*greedy Algorithm*) y optimización de enjambre de partículas (PSO), ya que, aunque estas técnicas han sido poco exploradas, tienen el potencial de dar buenos resultados, debido a su buena capacidad de exploración global y explotación local de resultados y su eficiencia computacional para obtenerlos.

También se incita a la búsqueda de metaheurísticas que generen buenos resultados para proyectos con objetivos de decisión más enfocados en energías y emisiones de gas, que será el siguiente gran tema de discusión en el espacio de las AS/RS.

Finalmente se recomendaría realizar una investigación de las políticas de control en las AS/RS, ya que se encontró poca información actualizada respecto al tema, y se considera una variante importante en los resultados que se pueden obtener con su uso.

Referencias Bibliográficas

- Atmaca, E., & Ozturk, A. (2013). Defining order picking policy: A storage assignment model and a simulated annealing solution in AS/RS systems. *Applied Mathematical Modelling*, 37(7), 5069–5079. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.057>
- Azzi, A., Battini, D., Faccio, M., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2011). Innovative travel time model for dual-shuttle automated storage/retrieval systems. *Computers and Industrial Engineering*, 61(3), 600–607. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.04.015>
- Bessenouci, H. N., Sari, Z., & Ghomri, L. (2012). Metaheuristic based control of a flow rack automated storage retrieval system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(4), 1157–1166. <https://doi.org/10.1007/s10845-010-0432-1>
- Buckow, J. N., & Knust, S. (2023a). The warehouse reshuffling problem with swap moves. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102994>
- Buckow, J. N., & Knust, S. (2023b). The warehouse reshuffling problem with swap moves and time limit. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2023.100113>
- Chen, L., Langevin, A., & Riopel, D. (2010). The storage location assignment and interleaving problem in an automated storage/retrieval system with shared storage. *International Journal of Production Research*, 48(4), 991–1011. <https://doi.org/10.1080/00207540802506218>
- Chen, L., Langevin, A., & Riopel, D. (2011). A tabu search algorithm for the relocation problem in a warehousing system. *International Journal of Production Economics*, 129(1), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.09.012>

- Codina, L., & Pedraza-Jiménez, R. (2011). Tesoros y ontologías en sistemas de información documental. *Profesional de La Informacion*, 20(5), 555–563.
<https://doi.org/10.3145/epi.2011.sep.10>
- Córdoba, E. (2023). *Optimización de un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación de doble*.
- Dong, W., Jin, M., Wang, Y., & Kelle, P. (2021). Retrieval scheduling in crane-based 3D automated retrieval and storage systems with shuttles. *Annals of Operations Research*, 302(1), 111–135. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-03967-8>
- Fandi, W., Kouloughli, S., & Ghomri, L. (2022). Multi-shuttle AS/RS dimensions optimization using a genetic algorithm—case of the multi-aisle configuration. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(1–2), 1219–1236.
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-08787-z>
- Figueiredo, J., Oliveira, J. A., Dias, L., & Pereira, G. A. B. (2012). *A Genetic Algorithm for the Job Shop on an ASRS Warehouse* (pp. 133–146). https://doi.org/10.1007/978-3-642-31137-6_10
- Geng, S., Wang, L., Li, D., Jiang, B., & Su, X. (2022). Research on scheduling strategy for automated storage and retrieval system. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 7(3), 522–536. <https://doi.org/10.1049/cit2.12066>
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2007). Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 1–21.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.025>

- He, M., Guan, Z., Wang, C., & Hou, G. (2023). Multiple-Rack Strategies Using Optimization of Location Assignment Based on MRCGA in Miniload Automated Storage and Retrieval System. *Processes*, *11*(3). <https://doi.org/10.3390/pr11030950>
- Hernández, M. S. (2023). Order batching problems: Taxonomy and literature review. *Lenguas Modernas*, *62*, 183–209. <https://doi.org/10.13039/501100011033>
- Homayouni, S. M., Tang, S. H., & Motlagh, O. (2014). A genetic algorithm for optimization of integrated scheduling of cranes, vehicles, and storage platforms at automated container terminals. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, *270*, 545–556. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2013.11.021>
- Hsu, H. P., Wang, C. N., & Dang, T. T. (2022). Simulation-Based Optimization Approaches for Dealing with Dual-Command Crane Scheduling Problem in Unit-Load Double-Deep AS/RS Considering Energy Consumption. *Mathematics*, *10*(21). <https://doi.org/10.3390/math10214018>
- Hu, K. Y., & Chang, T. S. (2010). An innovative automated storage and retrieval system for B2C e-commerce logistics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *48*(1–4), 297–305. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2292-4>
- Huh, J., Chae, M. jung, Park, J., & Kim, K. (2019). A case-based reasoning approach to fast optimization of travel routes for large-scale AS/RSs. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *30*(4), 1765–1778. <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1349-8>
- Katherine, L., & Cordobes, K. (2012). *INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS APLICADAS PARA EL*.
- Kazemi, M., Asef-Vaziri, A., & Shojaei, T. (2019). Concurrent optimization of shared location assignment and storage/retrieval scheduling in multi-shuttle automated storage and retrieval

- systems. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 2531–2536.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.587>
- Lei, B., Jiang, Z., & Mu, H. (2019). Integrated Optimization of Mixed Cargo Packing and Cargo Location Assignment in Automated Storage and Retrieval Systems. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9072847>
- Lerher, T., & Šraml, M. (2012). Designing Unit Load Automated Storage and Retrieval Systems. In *Warehousing in the Global Supply Chain* (pp. 211–231). Springer London.
https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2274-6_9
- Lersteau, C., & Shen, W. (2022). A survey of optimization methods for Block Relocation and PreMarshalling Problems. *Computers and Industrial Engineering*, 172.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108529>
- Li, D., Wang, L., Geng, S., & Jiang, B. (2021). Path planning of AS/RS based on cost matrix and improved greedy algorithm. *Symmetry*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/sym13081483>
- Li, H., Lyu, J., Zhen, L., & Zhuge, D. (2022). 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*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100042>
- Lu, J., Xu, L., Jin, J., & Shao, Y. (2022). A Mixed Algorithm for Integrated Scheduling Optimization in AS/RS and Hybrid Flowshop. *Energies*, 15(20).
<https://doi.org/10.3390/en15207558>
- M. Almufti, S., Ahmad Shaban, A., Arif Ali, Z., Ismael Ali, R., & A. Dela Fuente, J. (2023a). Overview of Metaheuristic Algorithms. *Polaris Global Journal of Scholarly Research and Trends*, 2(2), 10–32. <https://doi.org/10.58429/pgjsrt.v2n2a144>

- M. Almufti, S., Ahmad Shaban, A., Arif Ali, Z., Ismael Ali, R., & A. Dela Fuente, J. (2023b). Overview of Metaheuristic Algorithms. *Polaris Global Journal of Scholarly Research and Trends*, 2(2), 10–32. <https://doi.org/10.58429/pgjsrt.v2n2a144>
- Man, X., Zheng, F., Chu, F., Liu, M., & Xu, Y. (2021). Bi-objective optimization for a two-depot automated storage/retrieval system. *Annals of Operations Research*, 296(1–2), 243–262. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03222-1>
- Manzini, R., Gamberi, M., & Regattieri, A. (2006). Design and control of an AS/RS. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(7–8), 766–774. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2427-6>
- Mohammad El-Basioni, B. M., & Abd El-Kader, S. M. (2023). Mission-based PTR triangle for multi-UAV systems flight planning. In *Ad Hoc Networks* (Vol. 142). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2023.103115>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., Antes, G., Atkins, D., Barbour, V., Barrowman, N., Berlin, J. A., Clark, J., Clarke, M., Cook, D., D'Amico, R., Deeks, J. J., Devereaux, P. J., Dickersin, K., Egger, M., Ernst, E., Gøtzsche, P. C., ... Tugwell, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. In *PLoS Medicine* (Vol. 6, Issue 7). Public Library of Science. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Nia, A. R., Haleh, H., & Saghaei, A. (2017). Energy-conscious dynamic sequencing method for dual command cycle unit-load multiple-rack automated storage and retrieval systems. *Scientia Iranica*, 24(6), 3371–3393. <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4395>

- Nicolas, L., Yannick, F., & Ramzi, H. (2018). Order batching in an automated warehouse with several vertical lift modules: Optimization and experiments with real data. *European Journal of Operational Research*, 267(3), 958–976. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.12.037>
- Peña Tibaduiza, E. M., Garavito Hernández, E. A., Pérez Figueredo, L. E., & Moratto Chimenty, E. (2017). Revisión de la Literatura sobre el Problema de Programación de “Flow Shop” Híbrido con Máquinas Paralelas no Relacionadas. *Ingeniería*, 22(1), 46. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.1.a03>
- Peñuela, L. (2018). *MÉTODO METAHEURÍSTICO DE REASIGNACIÓN DE PRODUCTOS EN UN CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE AUTOPARTES*. <http://hdl.handle.net/10654/17928>
- Popović, D., Vidović, M., & Bjelić, N. (2014). Application of genetic algorithms for sequencing of AS/RS with a triple-shuttle module in class-based storage. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 26(3), 432–453. <https://doi.org/10.1007/s10696-012-9139-2>
- Rajković, M., Zrnić, N., Kosanić, N., Borovinšek, M., & Lerher, T. (2019). A multi-objective optimization model for minimizing investment expenses, cycle times and CO2 footprint of an automated storage and retrieval systems. *Transport*, 34(2), 275–286. <https://doi.org/10.3846/transport.2019.9686>
- Ramos De Carvalho, E. M. (n.d.). *67th IFLA Council and General Conference La literatura gris y su contribución a la sociedad del conocimiento*.
- Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. A. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 194(2), 343–362. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.01.038>
- Roosbeh Nia, A., Haleh, H., & Saghaei, A. (2017). Dual command cycle dynamic sequencing method to consider GHG efficiency in unit-load multiple-rack automated storage and retrieval

- systems. *Computers and Industrial Engineering*, *111*, 89–108.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.07.007>
- Song, Y., & Mu, H. (2022). Integrated Optimization of Input/Output Point Assignment and Twin Stackers Scheduling in Multi-Input/Output Points Automated Storage and Retrieval System by Ant Colony Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022.
<https://doi.org/10.1155/2022/5997095>
- Vasili, M. R., Tang, S. H., & Vasili, M. (2012). Automated storage and retrieval systems: A review on travel time models and control policies. In *Springer 4* (Vol. 9781447122746, pp. 159–209). TUT Press. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2274-6_8
- Wang, Y., Mou, S., & Wu, Y. (2016). Storage assignment optimization in a multi-tier shuttle warehousing system. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, *29*(2), 421–429. <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.1221.152>
- Wang, Y., Zhang, R., Liu, H., Zhang, X., & Liu, Z. (2019). Task scheduling model of double-deep multi-tier shuttle system. *Processes*, *7*(9). <https://doi.org/10.3390/pr7090604>
- Wauters, T., Villa, F., Christiaens, J., Alvarez-Valdes, R., & Vanden Berghe, G. (2016). A decomposition approach to dual shuttle automated storage and retrieval systems. *Computers and Industrial Engineering*, *101*, 325–337. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.09.013>
- Wu, K. Y., Xu, S. S. D., & Wu, T. C. (2013). Optimal scheduling for retrieval jobs in double-deep AS/RS by evolutionary algorithms. *Abstract and Applied Analysis*, 2013.
<https://doi.org/10.1155/2013/634812>
- Yan, X., Zhang, Z., Liu, Q., Lv, C., Zhang, L., & Li, S. (2021). An NSABC algorithm for multi-aisle AS/RS scheduling optimization. *Computers and Industrial Engineering*, *156*.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107254>

- Yang, P., Miao, L., Xue, Z., & Qin, L. (2015). An integrated optimization of location assignment and storage/retrieval scheduling in multi-shuttle automated storage/retrieval systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(6), 1145–1159. <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0846-7>
- Yang, P., Peng, Y., Ye, B., & Miao, L. (2017). Integrated optimization of location assignment and sequencing in multi-shuttle automated storage and retrieval systems under modified 2n-command cycle pattern. *Engineering Optimization*, 49(9), 1604–1620. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2016.1261128>
- Yang, Z., Wang, L., Cai, Y., & Kimie, K. (2019). A polychromatic sets theory based algorithm for the input/output scheduling problem in AS/RSs. *Evolutionary Intelligence*, 12(3), 333–340. <https://doi.org/10.1007/s12065-018-0183-z>