

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

Modelo de Enrutamiento para la recolección de pedidos en un almacén convencional con líneas de dos bloques iguales, mediante los algoritmos heurísticos S-shape y la brecha más grande.

Plan de trabajo para optar el título de Ingeniería Industrial

Director

Vlakxmir Robles Marín

Magister en Ingeniería

Codirector

Javier Eduardo Arias Osorio

Magister en Administración

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2022

Tabla de contenido

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

Introducción.....	8
1 Generalidades del Proyecto.....	10
1.1 Planteamiento del problema.....	10
1.2 Justificación del proyecto.....	12
2 Objetivos.....	14
2.1 Objetivo general.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3 Revisión de literatura.....	15
3.1 Análisis Bibliométrico.....	15
3.1.1 Scopus.....	16
3.1.1.1 <i>Indicadores básicos</i>	16
3.1.1.1.1 Documentos por año.....	17
3.1.1.1.2 Área temática.....	17
3.1.1.2.1 Autores.....	18
3.1.1.2.2 Países.....	19
3.1.1.3 <i>Indicadores de relación</i>	20
3.1.1.3.1 Palabras claves.....	20
3.1.1.3.2 Citación de autores.....	21
3.1.2 Web of Science.....	22
3.1.2.1 <i>Indicadores básicos</i>	22
3.1.2.1.1 Documentos por año.....	23
3.1.2.1.2 Área temática.....	24
3.1.2.1.3 Autores.....	25
3.1.2.1.4 Países.....	26
3.1.2.2 <i>Indicadores de relación</i>	26

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

3.1.2.2.1	Palabras clave.....	27
3.1.2.2.2	Citación de autores.....	27
3.1.3	ScienceDirect.....	28
3.1.3.1	Indicadores básicos.....	28
3.1.3.1.1	Documentos por año.....	28
3.1.3.1.2	Área temática.....	29
3.1.3.2	Indicadores de relación.....	29
3.1.3.2.1	Palabras claves.....	30
3.2	Análisis preliminar de la literatura.....	30
4	Marco Teórico.....	37
4.1	Logística.....	37
4.1.1	La logística de almacenamiento.....	38
4.2	Almacenamiento.....	38
4.2.1	Análisis ABC.....	39
4.2.1.1	Métodos de solución.....	40
4.2.1.1.1	Proceso de Jerarquía Analítica.....	40
4.2.1.1.2	Optimización Lineal.....	40
4.2.1.1.3	Redes Neuronales.....	40
4.2.1.1.4	Agrupación.....	40
4.3	Preparación de pedidos.....	40
4.4	Optimización de rutas de “Picking”.....	41
4.5	Diseño del almacén.....	42
4.5.1	Almacenes convencionales.....	42
4.5.1.1	Almacén de dos bloques iguales.....	42
4.5.2	Almacenes no convencionales.....	43

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

4.5.3	Almacenes generales.....	43
4.6	<i>Optimización combinatoria</i>	44
4.6.1	Problema del agente viajero.....	45
4.6.2	Teoría de la complejidad computacional.....	46
4.7	Algoritmos de Solución.....	47
4.7.1	Algoritmos exactos.....	47
4.7.2	Heurística.....	48
4.7.2.1	S-Shape.....	48
4.7.2.2	La brecha más grande.....	49
4.7.2.3	Midpoint.....	50
4.7.2.4	Return.....	51
4.7.2.5	Combined.....	52
4.7.3	Metaheurística.....	53
4.8	Herramienta computacional python.....	54
5	Metodología.....	54
5.1	Fase 1. Realizar una revisión bibliográfica en general sobre el problema a tratar	54
5.2	Fase 2. Definir las características del problema.....	54
5.3	Fase 3. Adaptar un modelo matemático.....	54
5.4	Fase 4. Definir y desarrollar los algoritmos a usar.....	55
5.5	Fase 5. Evaluar los algoritmos.....	55
5.6	Fase 6. Documentación.....	56
6	Descripción del problema y modelo matemático.....	56
6.1	Descripción del problema.....	56
6.2	Modelo Matemático.....	58

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

6.2.1	Formulación del problema.....	58
7	Diseño seudocódigos heurísticas S-Shape y la brecha más grande.....	66
8	Marco de Referencia.....	68
8.1	Marco de Antecedentes.....	68
9	Referencias Bibliográficas.....	71

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

Lista de tablas

Tabla 1 Estructura del proyecto.....	57
--------------------------------------	----

Lista de apéndices

Apéndice B Revisión de matrícula.....	64
---------------------------------------	----

Apéndice B Revisión de matrícula.....	
---------------------------------------	--

65

Lista de figuras

Figura 1. Desarrollo del tema con el pasar de los años en Scopus.....	12
Figura 2. Área temática en Scopus.....	13
Figura 3. Autores más relevantes en Scopus.....	13
Figura 4. Países destacados en tema de investigación en Scopus.....	14
Figura 5. Países destacados en tema de investigación en Scopus.....	15
Figura 6. Autores más importantes teniendo en cuenta las citaciones en Scopus.....	16
Figura 7. Desarrollo del tema con el pasar de los años en Web of Science.....	18
Figura 8. Área temática en Web of Science.....	19
Figura 9. Autores más relevantes en Web of Science.....	19
Figura 10. Países destacados en tema de investigación en Web of Science.....	20
Figura 11. Concurrencia palabras clave en Web of Science.....	21
Figura 12. Autores más importantes teniendo en cuenta las citaciones en Web of Science....	22
Figura 13. Desarrollo del tema a lo largo de los años en ScienceDirect.....	23
Figura 14. Área temática en ScienceDirect.....	23
Figura 15. Concurrencia pablaras claves en ScienceDirect.....	24

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

Figura 16. Línea del tiempo de documentos relacionados al enrutamiento.....	31
Figura 17. Diseño almacén de dos bloques iguales.....	43
Figura 18. Ejemplo recolección de una ruta s-shape.....	50
Figura 19. Ejemplo recolección de una ruta la brecha más grande.....	51
Figura 20. Ejemplo recolección de una ruta midpoint.....	52
Figura 21. Ejemplo recolección de una ruta return.....	53
Figura 22. Ejemplo recolección de una ruta combined.....	54
Figura 23. Cronograma de actividades.....	59
Figura 24. Presupuesto.....	60
Figura 25. Matricula.....	64
Figura 26. Matricula.....	65

Introducción

La pandemia del covid-19 durante 2020 golpeó los mercados mundiales, y aunque algunos mercados se vieron afectados por el frenazo en la actividad económica, el e-commerce, por el contrario, creció vertiginosamente. De acuerdo con el más reciente informe de la Cámara Colombiana de Comercio Electrónico, el e-commerce experimentó un crecimiento acelerado en 2020 en respuesta a las medidas de confinamiento establecidas en el país, experimentando un alza de 11% semanal en los momentos más críticos de la cuarentena. (Toro,2020).

Al aumentar exponencialmente las ventas online, se generan desafíos sobre los sistemas de distribución, como el de mantener e incluso mejorar los tiempos de entrega, por consiguiente, se requieren análisis y mejoras en una serie de actividades desde la entrada del pedido como

seleccionar los productos comprados, empaquetarlos adecuadamente y realizar el respectivo envío a sus clientes, este proceso se denomina picking.

Para entender el impacto financiero de esta actividad en una bodega, se ha podido establecer que, en una instalación mal proyectada, los costos del picking en el almacén pueden superar el 60% de los costos operativos totales del almacén (Tompkins et al.,2003).

Para reducir al mínimo tolerable es un objetivo cuyo cumplimiento puede significar la diferencia entre una empresa competitiva y otra que no lo es, entre permanecer en el mercado o desaparecer, por lo tanto es importante tener en cuenta los diferentes diseños de almacenes convencionales tales como: almacén de una cuadra que contiene solo dos pasillos transversales, en la parte delantera y trasera, a su vez el almacén de dos bloques tiene las mismas características anteriores mencionadas, pero además este cuenta con un pasillo transversal que pasa por el centro del depósito.

Teniendo en cuenta que el almacenamiento convencional con líneas de dos bloques iguales supone una alternativa viable para optimizar los tiempos de picking para el comercio electrónico, en esta investigación el problema a tratar es el enrutamiento teniendo en cuenta variaciones en el número de pickers, un único depósito y clasificación ABC es de tipo NP-hard (Weidinger, Boysen y Schneider, 2019) por la variedad de productos almacenados ubicados en un número variable de estantes y en posiciones distintas dentro de ellos, provocando así, múltiples rutas posibles por las que puede optar el selector, así como múltiples alternativas de depósito. Dada la trascendencia y actualidad del tema se han venido desarrollando trabajos en diferentes facultades incluyendo la Escuela de Estudios Industriales y Empresariales de la Universidad Industrial de Santander, destacándose el proyecto titulado “Un Algoritmo de Búsqueda Tabú para El Problema de Enrutamiento de un Recolector (SPRP) en un Almacén de Comercio Electrónico con Almacenamiento Disperso y Múltiples

Depósitos” del cual se han desprendido ponencias tanto nacionales como internacionales por lo tanto sugiere un campo prometedor de investigación.

Tabla 1

Estructura del proyecto

Objetivos	Capítulos y subcapítulos
Realizar una revisión bibliográfica sobre el picker routing problem warehouse y sus métodos de solución.	Capítulo 2
<ul style="list-style-type: none"> • Construir la ecuación de búsqueda • Realizar el análisis bibliométrico de los resultados de la ecuación de búsqueda 	Subcapítulo 2.1
Definir las características del problema de optimización específico a trabajar.	Capítulo 6
<ul style="list-style-type: none"> • Características de los tipos de almacenes, métodos de solución, políticas de enrutamiento. 	Subcapítulo 6.2
Formular un modelo matemático para el problema de ruteo de recolección de pedidos en almacenes.	Capítulo 7
Definir y desarrollar los algoritmos a usar para dar solución al modelo formulado.	Capítulo 8
Evaluar los algoritmos a partir de las variables, restricciones y supuestos del problema abordado.	Capítulo 9

1 Generalidades del Proyecto

1.1 Planteamiento del problema

El almacén convencional de dos bloques es bastante común según la bibliografía encontrada en las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect, dicho almacén contiene un pasillo transversal adicional a los dos pasillos transversales, en la parte delantera y trasera que pasa por el centro del almacén. Al dividir el espacio de recolección en dos partes iguales, este pasillo transversal central aumenta la cantidad de oportunidades para que los trabajadores cambien de pasillo. Cuando se visita más de una ubicación en un solo recorrido, tener pasillos transversales adicionales en un almacén puede reducir las distancias de viaje entre ubicaciones al aumentar la cantidad de opciones de ruta. Es importante rescatar de esto, ya que según el diseño que tenga el almacén puede llegar a brindar una reducción en la distancia de recorrido para la operación de preparación de pedidos, que es la operación más costosa y la más estrechamente asociada con el tiempo de entrega de los pedidos.

La preparación de pedidos es la operación del almacén que se encarga de acondicionar los productos demandados por los clientes para que sean enviados en forma de pedidos, dicho lo anterior esta es la operación que más tiempo requiere y mayores costos genera debido a las operaciones intensivas en mano de obra del sistema, la preparación de pedidos comprende alrededor del 50% de los costos operativos totales del almacén, mientras que los viajes representan casi la mitad, con el objetivo de minimizar costos y tiempo a la hora de realizar la operación correspondiente se utilizan diferentes modelos de enrutamiento los cuales tienen entre otros los siguientes métodos de solución que son heurísticas, metaheurísticas y algoritmos exactos. En el caso particular de la investigación se va a abordar los métodos heurísticos s-shape y la brecha más grande.

Las heurísticas son un método usado para hacer más sencilla la solución de problemas difíciles. Debido a la existencia de algunos problemas importantes con un gran interés

práctico complejos de resolver, comienzan a surgir algoritmos capaces de ofrecer posibles soluciones que, aunque no consiguen el resultado óptimo, sí se acercan en un tiempo de cálculo razonable. En esta investigación se busca comparar los algoritmos S-shape y la Brecha más grande encontrando soluciones factibles de mínimas distancias, teniendo en cuenta que en los artículos encontrados en las bases de datos no se evidencia la comparación entre estos dos.

Para que la operación de la preparación de pedidos se pueda optimizar y tener mejores resultados se considera pertinente realizar un modelo de enrutamiento que es el encargado de brindar posibles rutas teniendo en cuenta diferentes variables. En esta investigación se considera un almacén convencional con dos bloques iguales en donde se tiene en cuenta un único depósito y variaciones con el número de recolectores, en donde se transportan los pedidos demandados, por consiguiente, se quiere obtener un modelo que evidencie la ruta que genera para el recolector la mínima distancia total recorrida.

El problema reside en la programación para un conjunto de P pedidos $p = \{1, 2, \dots, p\}$, donde los productos están ubicados en un conjunto V de posiciones $V = \{1, 2, \dots, v\}$ dentro del almacén y son almacenados en un conjunto S de SKU o unidades de almacenamiento $S = \{1, 2, \dots, s\}$. Este problema cuenta con un solo depósito donde se pueden entregar los pedidos, en cada posición de secuencia se visita una posición de almacenamiento, se tiene un máximo de pedidos activos, de modo que no se exceda la capacidad que se va a manejar para el carrito. Se considera una variación en el número de recolectores, por lo tanto, se debe tener en cuenta el tamaño de los pasillos para que cuando se tenga más de un recolector no se vaya a presentar ningún tipo de bloqueo entre ellos en las diferentes partes del almacén; de igual forma, se tendrá una clasificación ABC, con el fin de variar la ruta para la recolección de pedidos dependiendo su clasificación e identificar las posibles rutas factibles por las que quiere optar el selector.

1.2 Justificación del proyecto

Actualmente sin duda alguna el internet es el medio más utilizado teniendo en cuenta la importancia que ha adquirido como consecuencia a la emergencia sanitaria que se vive actualmente, se considera una necesidad para las empresas a la hora de facilitar el proceso de compra a los clientes, debido a esto, surge una etapa mucho más sólida del eCommerce; un sistema de compra y venta de productos y servicios que utiliza el internet como medio principal de intercambio, en otras palabras se trata de un comercio que gestiona los cobros y pagos a través de medios electrónicos, donde le permite a sus clientes poder acceder a sus productos o servicios desde cualquier parte del mundo. El eCommerce en Latinoamérica ha crecido a tasas del 30% en los últimos cinco años y se espera que en los próximos tres, este crecimiento sea entre el 40 y 50%, debido a la llegada de las redes 5G (Pueyrredó M, 2019) presidente del eCommerce Institute. Cabe destacar que el eCommerce en Colombia representa el 4,4% de Latinoamérica.

Por esta razón para el eCommerce es un gran reto la recolección de pedidos dado que es la actividad prioritaria en el proceso de alistamiento de órdenes, teniendo en cuenta que el diseño del área de almacenamiento en los centros de distribución, busca facilitar la optimización de los recorridos, la rapidez de la preparación de los pedidos, la precisión de los mismos y la colocación más eficiente de las existencias todos ellos en pro de conseguir ciclos de pedido más rápidos, menores costos de operación, capacidad de almacenamiento y mejor servicio al cliente, está es la manera más productiva de disminuir costos, aumentar ganancia, optimizar uso de recursos dentro del almacén; dado que en el presente el mejoramiento continuo es una necesidad.

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

En la actualidad, la recolección de pedidos es fundamental para las empresas porque son parte de la cadena de suministro y de la logística, donde hay una oportunidad para buscar mejorar el rendimiento de las operaciones que ocurren en el almacén, con metodologías para cumplir los objetivos de las empresas, pero sin la necesidad de grandes inversiones en tecnologías. Se conoce como la actividad más costosa de una bodega o centro de distribución típico, ya que, representa el 65% de los costos operativos y el 50% de la fuerza de trabajo.

El proyecto se realiza con la necesidad de mejorar la productividad de los almacenes, este se enfoca en el proceso de alistamiento de órdenes porque es la actividad que más representa costos y esfuerzos, además de esta depende en gran medida la entrega a tiempo de pedidos al cliente final y el flujo adecuado del proceso productivo.

El problema a tratar en esta investigación es el enrutamiento teniendo en cuenta variaciones en el número de pickers para un almacén convencional con líneas de dos bloques iguales un único depósito y clasificación ABC, con el fin de variar la ruta para la recolección de los pedidos dependiendo su clasificación e identificar las posibles rutas factibles por las que puede optar el selector, de igual forma se quiere evaluar qué sucede si los pedidos son homogéneos o heterogéneos, por esto se propone validar un algoritmo que contribuya a la reducción de las distancias recorridas en la recolección de los pedidos que repercute directamente en el tiempo de respuesta del almacén; cabe resaltar que el sistema convencional de almacenaje es el sistema más flexible y económico, debido a que su implementación es verdaderamente sencilla y su gran capacidad de adaptabilidad facilita los cambios que las empresas necesitan en función de sus necesidades. Esto da la posibilidad a que los almacenes se distribuyan de forma totalmente lógica. Por otra parte, es importante mencionar que en la literatura especializada hacen énfasis en la búsqueda de métodos eficientes y en la necesidad de reducir los tiempos de cálculo.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Comparar soluciones factibles de mínimas distancias para una distribución del almacén convencional con líneas de dos bloques iguales mediante el uso de algoritmos heurísticos

2.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre el picker routing problem warehouse y sus métodos de solución.
- Definir las características del problema de optimización específico a trabajar.
- Formular un modelo matemático para el problema de ruteo de recolección de pedidos en almacenes.
- Definir y desarrollar los algoritmos a usar para dar solución al modelo formulado.
- Evaluar los algoritmos a partir de las variables, restricciones y supuestos del problema abordado.
- Elaborar un artículo de carácter publicable con los resultados del trabajo de investigación.

3 Revisión de literatura

3.1 Análisis Bibliométrico

Se puede identificar el interés por el tema en especial en los años recientes debido al crecimiento exponencial de las ventas online (Aguilar, 2020) y esto tiene una estrecha relación con el surgimiento de nuevas tecnologías aptas para la comercialización de los productos en el mercado, de esta forma, se crea la necesidad de realizar investigaciones con el fin de obtener nuevas ideas para la adaptación y actualización de los cambios sociales que se van presentando.

Teniendo en cuenta el gran interés que se presenta por investigar este tipo de temas se evidencia un amplio volumen de información que se ha generado en su mayoría en los últimos años y además es de fácil acceso por lo tanto ha resultado atractivo para la comunidad interesada en investigar los temas en cuestión, en consecuencia se crea la

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

disciplina conocida como bibliometría la cual emplea conocimientos estadísticos y matemáticos con la finalidad de analizar el funcionamiento científico por ello cuenta con mecanismos utilizados para evaluar los aspectos de este fenómenos llamados indicadores bibliométricos como documentos publicados por año, autores, países, área temática, palabras clave y citación de autores. de lo anterior se deriva la importancia que tiene la bibliometría en el campo de la investigación por consiguiente se han creado opciones en las bases de datos como scopus, web of science y ScienceDirect que permiten extraer y analizar la información adquirida.

Para conseguir un buen criterio de la investigación para la recolección de pedidos en un almacén convencional con líneas de dos bloques iguales, mediante los algoritmos heurísticos S-shape y la brecha más grande, se utilizaron dos de las principales bases de datos, Scopus, Web of Science y ScienceDirect, en segundo lugar, se hizo un análisis tipo bola de nieve de citas en los artículos más relevante de la investigación.

Considerando que cada año se registra gran variedad de artículos es necesario acudir al análisis bibliométrico de tal forma que se puedan obtener los documentos relevantes para el tema de investigación en estudio.

los indicadores básicos se tendrán en cuenta para mostrar los documentos publicados por año, autores, países, área temática, para los indicadores de relación como palabras clave y citación de autores se utilizará la herramienta VOSviewer que sirve para construir y visualizar redes bibliométricas como palabras claves y citación de autores entre otras.

A continuación, se mostrará la ecuación de búsqueda y los análisis que se realizaron en las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect.

3.1.1 Scopus

Para realizar la búsqueda en scopus se utilizó la ecuación, ((Optimization) AND (picking) AND (heuristics) AND (warehouse) AND (orders)) al día 13/09/2021. Se limitó la información teniendo en cuenta los documentos con enfoque al proyecto propuesto.

3.1.1.1 Indicadores básicos

Al analizar los resultados de la búsqueda, se obtuvieron los siguientes gráficos estadísticos.

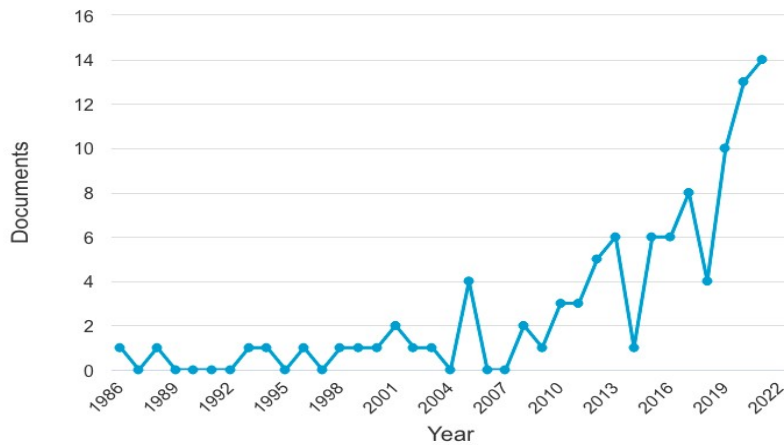
3.1.1.1.1 Documentos por año.

En la figura 1 se logra evidenciar el interés de investigar sobre este tema con el pasar de los años por ejemplo a partir del año 2010 se ve un crecimiento positivo, aun así, se coincide que en algunos años no se publicó ningún documento relacionado al tema. Por otro lado, llama especialmente la atención que del año 2017 al 2018 disminuyeron las investigaciones, sin embargo, a partir del año 2019 se observa que aumenta exponencialmente el número de documentos publicados según Scopus, por ende, se puede demostrar el aumento progresivo por parte de la comunidad académica al abordar este tipo de investigaciones.

Figura 1

Desarrollo del tema con el pasar de los años en Scopus

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO



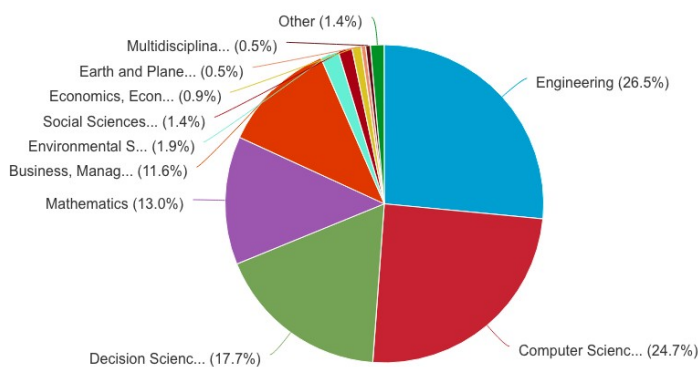
3.1.1.1.2 *Área temática.*

3.1.1.2

En la figura 2 las áreas de investigación más relevantes en esta temática teniendo en cuenta los documentos publicados son ingeniería y ciencias de computación con un 26,5% y 24,7% respectivamente, posterior ciencias de decisión y matemáticas con 17,7% y 13% respectivamente, cómo se puede evidenciar estas son las cuatro áreas que predominan con un 81,9% de los documentos publicados para el tema de interés en esta investigación, lo que sugiere que es un tema propio de nuestra disciplina de estudio ingeniería.

Figura 2

Área temática en Scopus



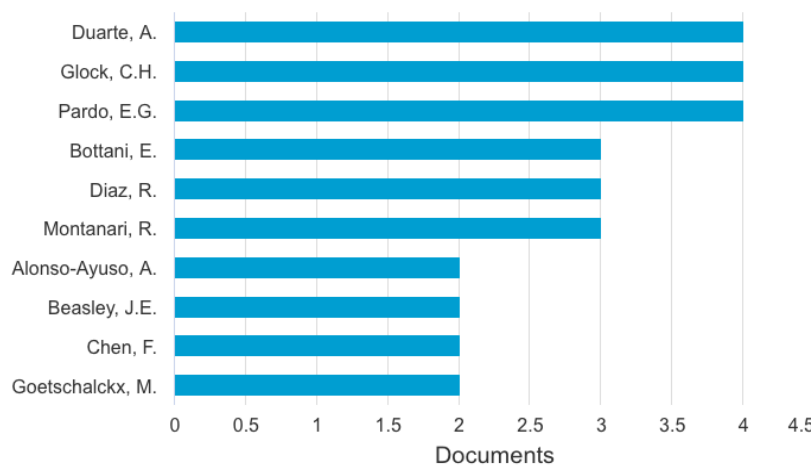
3.1.1.2.1 *Autores.*

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

En la figura 3 muestra los 10 autores más relevantes para la investigación teniendo en cuenta el número de documentos publicados, cabe señalar que los autores con mayor número de publicaciones son Duarte, A., Glock, C.H., Pardo, E.G. teniendo cada uno un total de 4 documentos, luego Bottani, E., Díaz, R., Montanari, R. cada uno con 3 documentos y finalmente los cuatro últimos con un total de 2 documentos cada uno, se refleja buen material de diferentes autores que pueden servir de referencia para la investigación.

Figura 3

Autores más relevantes en Scopus

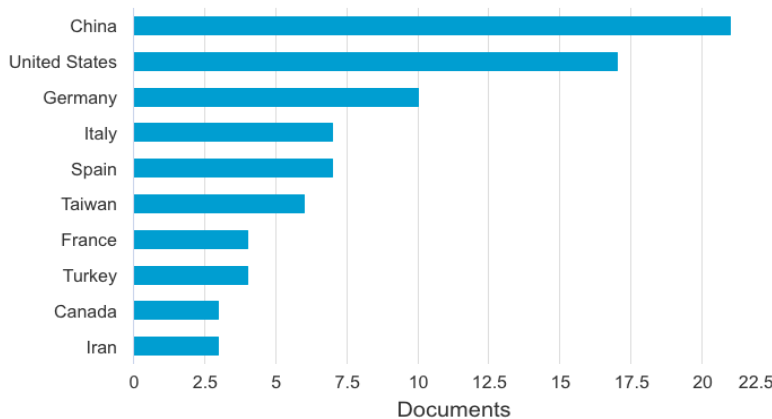


3.1.1.2.2 Países.

En la Figura 4 muestra los 10 países con mayor número de documentos publicados, se puede observar que China está liderando con un total de veintiún documentos relacionados con el tema de investigación, luego está Estados Unidos con diecisiete documentos, después Alemania con diez documentos y también se puede observar que los países con menos documentos publicados relacionados con este tema de investigación son Canadá e Irán con un total de 3 documentos, con respecto a la cantidad de documentos publicados cabe mencionar que se refleja interés de los países nombrados en investigar sobre estos temas.

Figura 4

Países destacados en tema de investigación en Scopus



Finalmente, en la base de datos Scopus a partir de la ecuación de búsqueda utilizada genera resultados en beneficio al tema de investigación por ejemplo que en los últimos años han aumentado notoriamente los artículos publicados en relación con la temática. Además, el enfoque del plan de trabajo es congruente con el campo de la ingeniería Industrial en mayor medida según el grafico estadístico obtenido en el análisis bibliométrico anteriormente, en consecuencia, la investigación toma valor puesto que es clara la importancia de continuar indagando respecto a dicho tema en cuestión.

3.1.1.3 Indicadores de relación.

Para la realización de los indicadores de relación se utilizó el software de VOSviewer, el cual es una herramienta de software que sirve para construir y visualizar redes bibliométricas, se pueden construir en base a citas, acoplamiento bibliográfico, co-citas o relaciones de autorías.

VOSviewer también ofrece funciones de extracción de texto que se pueden utilizar en redes de concurrencia de términos importantes extraídos de un cuerpo de literatura científica.

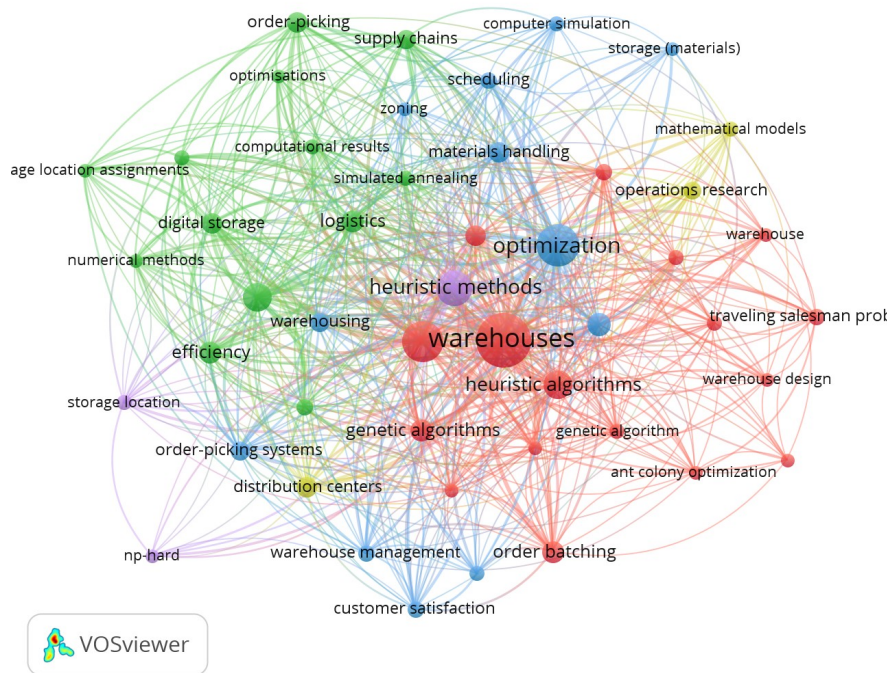
3.1.1.3.1 Palabras claves.

En la figura 5 se observa la concurrencia de palabras claves reunidas por colores en 5 clústeres los cuales representan algoritmos de agrupamiento por temáticas relevantes. En los colores que mejor se puede evidenciar es en el rojo, azul y morado en donde la palabra más usada es warehouse, optimization, heuristics methods respectivamente. Además, es

importante destacar que los círculos que tienen mayor tamaño representan más frecuencia de aparición de la palabra en los artículos.

Figura 5

Concurrencia palabras clave en Scopus

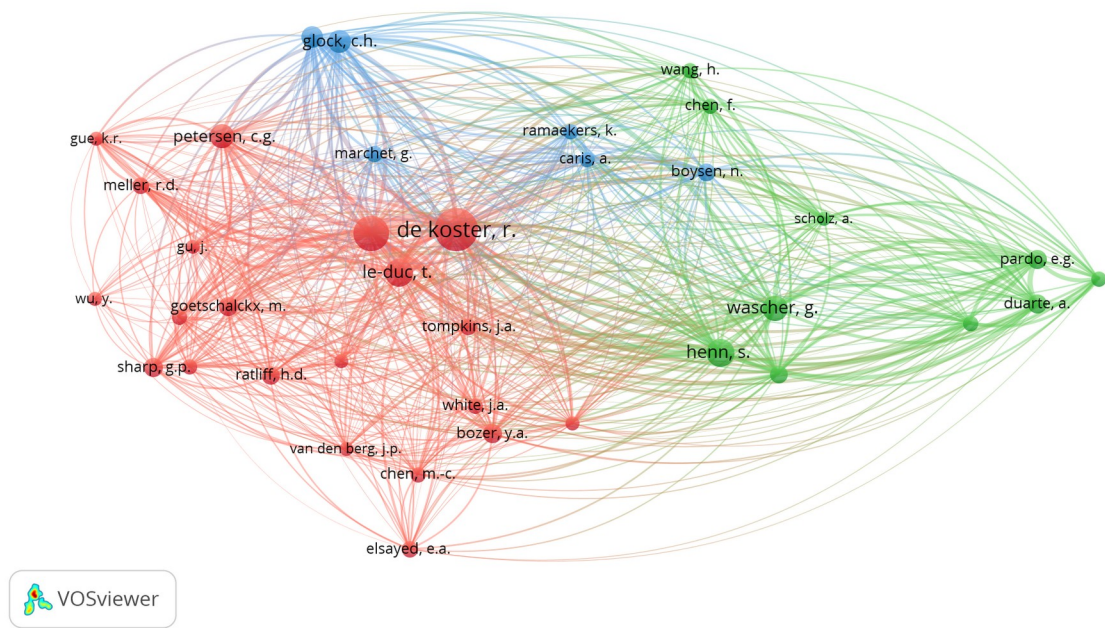


3.1.1.3.2 Citación de autores.

En la figura 6 se observa 3 clústeres los cuales representan grupos constituidos por los autores más importantes, teniendo en cuenta las citaciones a lo largo del tiempo. En este caso se evidencia que los círculos con mayor tamaño es el de Koster, r; Le. Duc, t. y Petersen, cg. lo que significa que estos autores son los que más citaciones tienen al pasar los años.

Figura 6

Autores más importantes teniendo en cuenta las citaciones en Scopus



3.1.2 Web of Science

Para realizar la búsqueda en web of science se utilizó la ecuación, ((Optimization) AND (picking) AND (heuristics OR s-shape OR biggest gap) AND (warehouse) AND (orders)), obteniendo 75 documentos al día 13/09/2021. Se limitó la información teniendo en cuenta los documentos con enfoque al proyecto propuesto.

3.1.2.1 Indicadores básicos

Al analizar los resultados de la búsqueda, se obtuvieron los siguientes gráficos estadísticos.

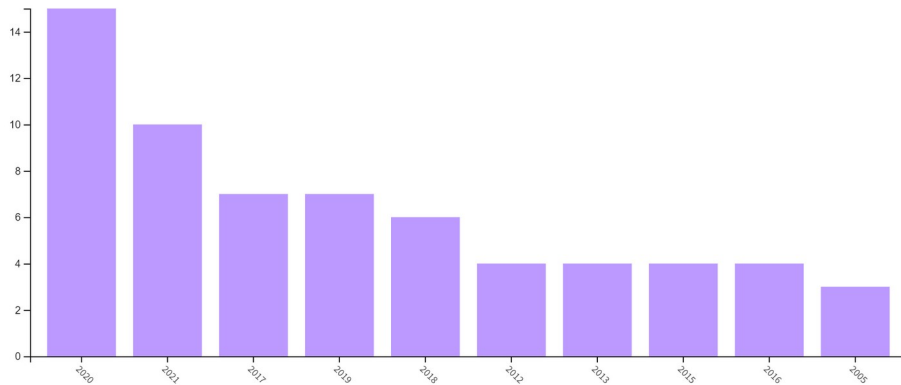
3.1.2.1.1 Documentos por año.

En la figura 7 se puede observar el aumento gradual de investigar sobre el tema de la investigación con el pasar de los años por ejemplo a partir del año 2005 hasta la actualidad se evidencia un crecimiento positivo, aun así la excepción a lo narrado anteriormente es que en el año 2019 el número de documentos publicados es menor a los publicados en los años 2018 y 2017, para finalizar llama especialmente la atención que desde el 2006 al 2011 no aparecen

documentos registrados en la base de datos que se toma como fuente, al igual que en las bases de datos Scopus se logra evidenciar el crecimiento progresivo por parte de la comunidad académica por abordar este tipo de investigaciones.

Figura 7

Desarrollo del tema con el pasar de los años en Web of Science



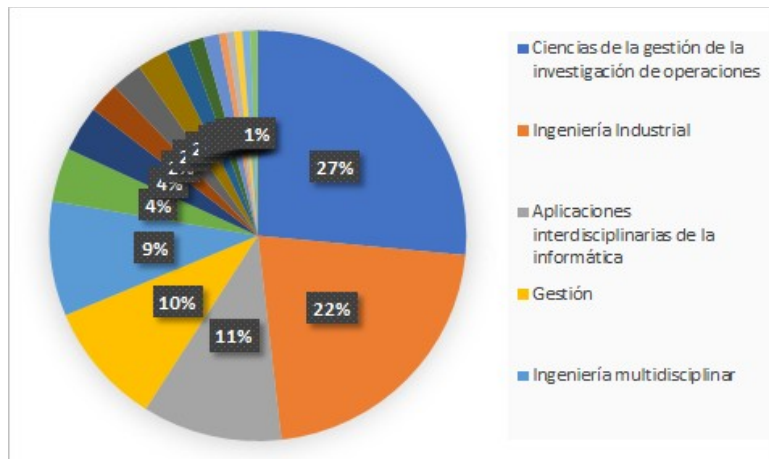
3.1.2.1.2 Área temática.

En la figura 8 las áreas de investigación más relevantes en esta temática teniendo en cuenta los documentos publicados con mayor relevancia son: ciencias de la gestión de la investigación de operaciones con un 27% de publicaciones, ingeniería Industrial 22%, Aplicaciones Interdisciplinarias de la informática 11%, Gestión con 10% y, por último, pero no menos importante Ingeniería multidisciplinar con 10% de registros. En definitiva, las anteriores áreas tienen el 70% de publicaciones respecto al tema en cuestión de la investigación, al igual que en la base de datos scopus se logra percibir la fuerza de investigación en ingeniería, en este caso en particular se acerca aún más a nuestro campo de la ingeniería industrial.

Figura 8

Área temática en Web of Science

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

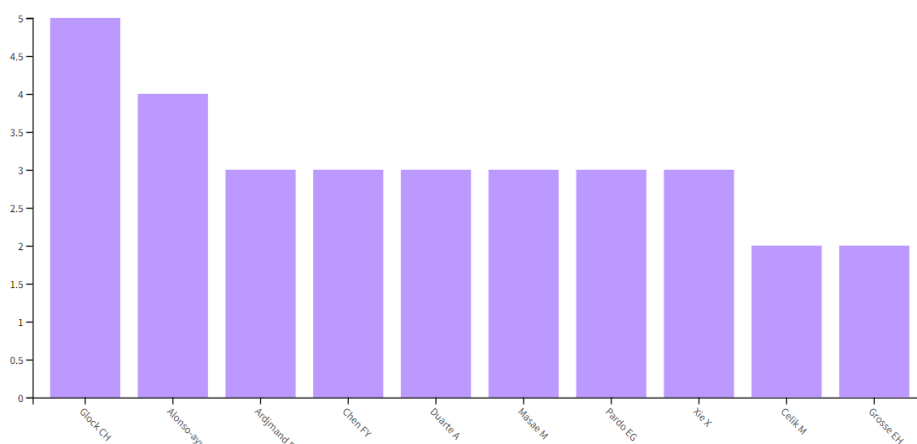


3.1.2.1.3 Autores.

En la figura 9 muestra los 10 actores más relevantes para la investigación teniendo en cuenta el número de documentos publicados, cabe señalar que los autores con mayor número de publicaciones son: Glock CH con 5 publicaciones, Alonso-ayuso A con 4 registros. Luego Ardjmand E, Chen FY, Duarte A, Masae M, Pardo EG, Xie X. cada uno con 3 registros publicados y por último Celik M, Grosse EH cada uno con 2 publicaciones registradas en la base de datos Web Of Science, se refleja buen material que pueden servir de referencia para la investigación.

Figura 9

Autores más relevantes en Web of Science

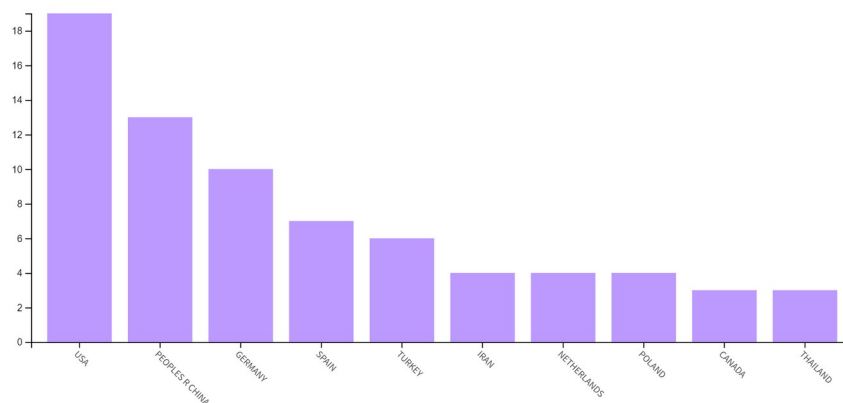


3.1.2.1.4 Países.

En la Figura 10 muestra los 10 países con mayor número de documentos publicados en la respectiva base de datos, se puede observar que Estados Unidos está liderando con un total de diecinueve documentos relacionados con el tema en cuestión de la investigación, luego está China con trece registros, después Alemania con siete publicaciones y también se puede evidenciar que los países con menos documentos publicados relacionados con este tema de investigación son Canadá y Tailandia con un total de 3 documentos asociados a la investigación, cabe resaltar que los países desarrollados tienen gran interés por investigar sobre el tema en estudio, por lo cual sugieren continuar indagando sobre la temática propuesta en la investigación.

Figura 10

Países destacados en tema de investigación en Web of Science



3.1.2.2 Indicadores de relación

Al igual que con Scopus, para la realización de los indicadores de relación se utilizó el software de VOSviewer.

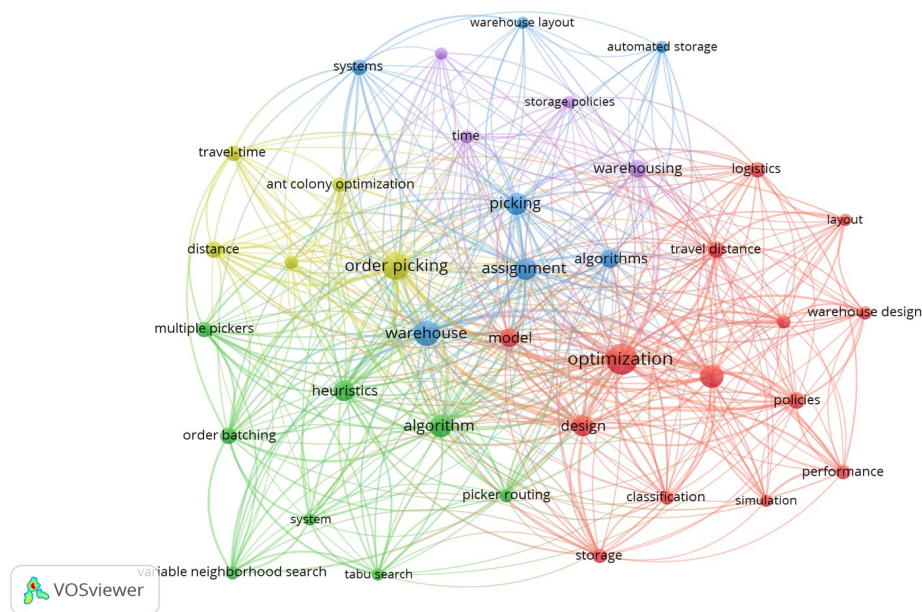
3.1.2.2.1 Palabras clave.

Al elaborar el tesauro, con el fin de eliminar duplicidades en términos, se encontró que los resultados estaban limpios, obteniendo 38 palabras, distribuidas en 4 clústeres, los

cuales representan algoritmos de agrupamiento por temáticas relevantes, se puede observar que las palabras claves sobresalientes son optimización, warehouse, picking y algorithms, por otro lado las menos destacadas son simulation, automated storage y system, teniendo en cuenta que las esferas de mayor tamaño es proporcional a la relevancia de las palabras claves.

Figura 11

Concurrencia palabras clave en Web of Science

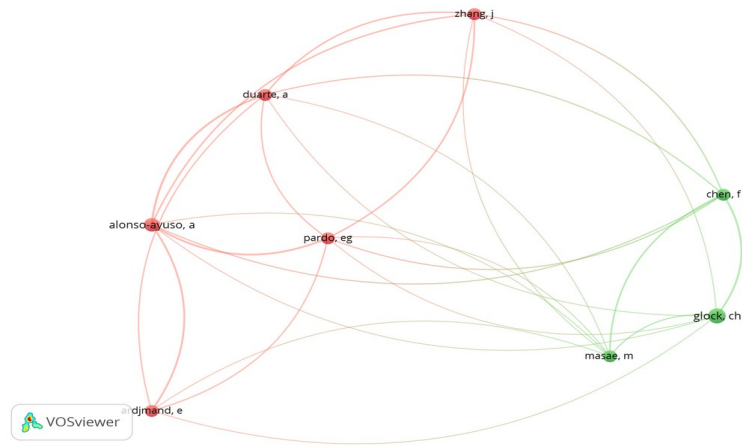


3.1.2.2.2 *Citación de autores.*

En la figura 12 se observa la concurrencia de citaciones distribuidas por colores en 2 clústeres de algoritmos de agrupamiento que representa las citaciones de los autores más importantes a lo largo del tiempo. En este caso se evidencia que la esfera con mayor tamaño es la de Alonso-ayuso, lo que significa que es el autor que más relevancia tiene con el pasar del tiempo.

Figura 12

Autores más importantes teniendo en cuenta las citaciones en Web of Science



3.1.3 ScienceDirect

Para realizar la búsqueda en web of science se utilizó la ecuación, ((Optimization) AND (picking) AND (heuristics) AND (warehouse) AND (orders)), obteniendo 567 documentos al día 15/09/2021. Se limitó la información teniendo en cuenta los documentos con enfoque al proyecto propuesto.

3.1.3.1 Indicadores básicos

Al analizar los resultados de la búsqueda, se obtuvieron los siguientes gráficos estadísticos.

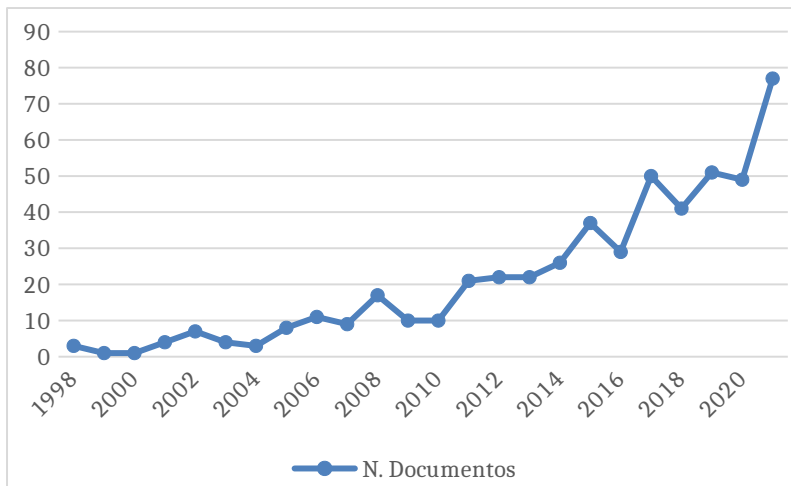
3.1.3.1.1 Documentos por año.

En la figura 13 se puede observar el crecimiento exponencial de las publicaciones y esto hace referencia al interés de los investigadores respecto al tema con el pasar de los años, por ejemplo a partir del año 20011 hasta la actualidad se evidencia un crecimiento positivo, por otra parte llama especialmente la atención que en el año 2016 disminuye el registro de los documentos publicados en la base de datos que se toma como fuente, en las tres bases de datos analizadas se logra evidenciar el crecimiento progresivo por parte de la comunidad académica por abordar este tipo de investigaciones.

Figura 13

Desarrollo del tema a lo largo de los años en ScienceDirect

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

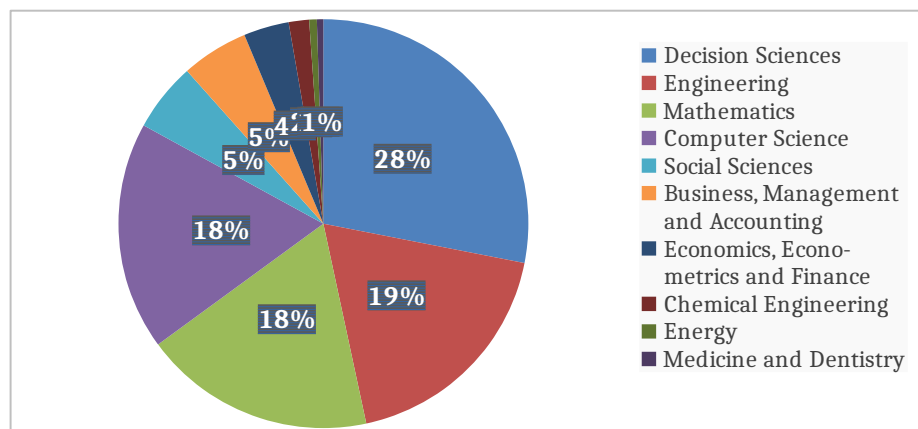


3.1.3.1.2 Área temática.

En la figura 14 las áreas de investigación más relevantes en esta temática teniendo en cuenta los documentos publicados con mayor relevancia son: ciencias de la decisión 28% de publicaciones, ingeniería 19%, matemáticas y ciencias de la computación 18%. En definitiva, las anteriores áreas tienen el 83% de publicaciones respecto al tema en cuestión de la investigación, al igual que en las anteriores bases de datos mencionadas, se logra percibir la fuerza de investigación en ingeniería, por consiguiente, sugiere a investigaciones futuras sobre el tema de estudio.

Figura 14

Área temática en ScienceDirect



3.1.3.2 Indicadores de relación

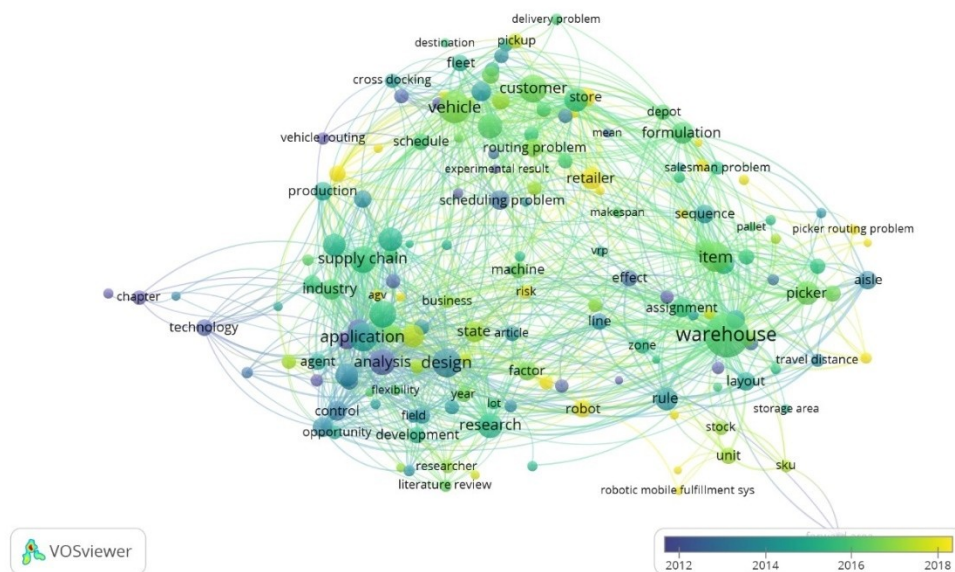
Al igual que con Scopus y Web of Science, para la realización de los indicadores de relación se utilizó el software de VOSviewer.

3.1.3.2.1 Palabras claves.

En la figura 15 se observa la concurrencia de palabras claves reunidas en 4 clústeres por colores los cuales representan algoritmos de agrupamiento por temáticas relevantes en los respectivos años. Los colores que se pueden evidenciar son el morado, azul, verde y amarillo, en los años 2012, 2014, 2016 y 2018 respectivamente, en donde la palabra que sobresale en cada uno de los años es analysis, desing, warehouse y retailer. Además, es importante destacar que los círculos que tienen mayor tamaño representan más frecuencia de aparición de la palabra en los artículos.

Figura 15

Concurrencia pablaras claves en ScienceDirect



3.2 Análisis preliminar de la literatura

Debido a la pandemia, se tuvieron que tomar medidas como el confinamiento lo cual genero incertidumbre para los empresarios, en vista de lo anterior se vieron en la obligación

de implementar y fortalecer las ventas online ya que era la única manera de llegar a los clientes, de la misma forma los clientes se vieron en la necesidad de crear la costumbre de realizar las compras por internet, esta situación que tuvo que enfrentar todo el mundo hizo que el comercio electrónico evolucionara el resultado de la implementación de las ventas online en pequeñas y medianas empresas que no ofrecían ese servicio.

Pero, sin embargo, la preparación de pedidos es una operación crítica para la mayoría de las empresas en línea, por lo cual diversos estudios han revelado que la recolección de órdenes es la actividad más costosa de una bodega o centro de distribución típico, pues representan el 65% de los costos operativos y el 50% de la fuerza de trabajo (Jiménez, 2013, generalidades en los centros de distribución, párr.2), sin embargo una política de preparación de pedidos diseñada adecuadamente puede minimizar tanto los costos de picking como los de logística en general.

Para el proceso mencionado anteriormente, las empresas toman decisiones sobre el diseño y el control de los sistemas de preparación de pedidos a nivel táctico u operativo. Estas decisiones comunes son en los centros de distribución y en los almacenes que pueden ser clasificados según su relación con el flujo de producción, ubicación, el material a almacenar, localización, logística y el enrutamiento de los selector(es), los costos obligan a utilizar el espacio de almacenamiento de manera más eficiente, de modo que se han desarrollado diversas maneras de asignar los productos a sus lugares de almacenamiento en los centros de distribución, tales como: almacenamiento dedicado (De Koster y Neuteboom, 2001), almacenamiento aleatorio (Choe y Sharp, 1991; Vidal, 2009), almacenamiento abierto (De Koster, Duc y Roodbergen, 2007) y (Hausman, Schwarz y Graves 1976), almacenamiento de acuerdo con su rotación (Vidal, 2009), almacenamiento basado en clases (Vidal, 2009), familias de agrupación (Koster et al., 2007) y, operaciones de recolección de ordenes (Picking) (Ratliff y Rosenthal, 1982) (Jiménez, 2013, generalidades en los centros de

distribución, párr.2), para resolver los diferentes problemas encontrados por los autores, en la literatura se han propuesto tres tipos generales de algoritmos:

Los algoritmos exactos siempre encuentran una óptima (es decir, la ruta más corta) a un problema de ruta del recolector de pedidos. Los ejemplos incluyen los algoritmos de RR, De Koster y Van der Poort (1998) y Roodbergen y De Koster (2001a , b) (Masae et al., 2020, característica del algoritmo, párr.2).

Las heurísticas son algoritmos dependientes del problema contruidos de acuerdo con sus especificaciones, y el resultado en la mayoría de los casos no es óptimo (Sörensen, 2015). Los ejemplos incluyen el recorrido conocido como forma de S, el punto medio y la heurística de brecha más grande (Hall, 1993) (Masae et al., 2020, característica del algoritmo, párr.3).

Las metaheurísticas son algoritmos independientes del problema de alto nivel que proporcionan un conjunto de pautas o estrategias para encontrar una solución aproximada al problema (Sörensen, 2015). Los ejemplos incluyen algoritmos genéticos (GA ; Tsai et al., 2008), optimización de colonias de hormigas (ACO ; Chen et al., 2013), optimización de enjambres de partículas (PSO ; Lin et al., 2016) o búsqueda tabú (TS ; Cortés et al., 2017) (Masae et al., 2020, característica del algoritmo, párr.4).

En el análisis previo de literatura que se tomaron de las bases de datos se logra plasmar una línea de tiempo de los artículos publicados que tratan el problema de recolección de pedidos desde diferentes perspectivas y métodos de solución que tienen como principal objetivo en común de minimizar los costos de picking que resulta ser costosa para las compañías dedicadas a actividades económicas que necesitan almacenamiento de productos, de este modo a lo largo de los años se tuvieron en consideración publicaciones relevantes a la investigación como para el caso de Koster, R., y Der Poor, E., (1998), donde estudian el problema de encontrar rutas eficientes de selección de pedidos tanto para almacenes, donde

los recolectores tienen un depósito central para cosecha y depositar carros y listas de selección, y modernos almacenes, donde los camiones de preparación de pedidos pueden recoger y depositar paletas en la cabecera de cada pasillo sin regresar al depósito, ampliaron el conocido algoritmo polinomial de Ratliff y Rosenthal que consideró almacenes con un depósito central. En la práctica, el problema se resuelve principalmente utilizando la denominada forma de S heurístico en el que los selectores de pedidos se mueven en una curva en forma de S a lo largo de las ubicaciones de selección, Los autores concluyeron que el nuevo algoritmo ofrece una reducción del tiempo de viaje por ruta de entre un 7 y un 34% obteniendo, así como resultado que la reducción del tiempo de viaje depende en gran medida de la disposición y el funcionamiento del depósito, siguiendo en este razonamiento se analiza el texto de T. Le-Duc., y Koster, R., (2005), en concordancia proponen un modelo probabilístico que les permite estimar la distancia de viaje promedio de un recorrido de recolección. Usando la distancia de viaje promedio como función objetivo, presentan una formulación matemática para el problema de optimización de la zona de almacenamiento. Sin embargo, el enfoque exacto solo puede manejar instancias de almacén de tamaño pequeño. Para sortear este obstáculo, proponen una heurística, al realizar una serie ejemplos numéricos muestran que el método heurístico funciona muy bien en todos los casos, Después del desarrollo del procedimiento heurístico los autores lograron deducir que cuando se parte de una solución factible y simplemente se intercambian clases de almacenamiento entre pasillos, las otras condiciones se satisfacen automáticamente. En definitiva, las soluciones factibles generan mejores resultados que las soluciones óptimas obtenidas de los métodos exactos, este documento es un ejemplo claro porqué tomaron en consideración un diseño simple y para este diseño sólo fue relevante la heurística de retorno.

A continuación, en el artículo publicado por Onut et al., (2008), utilizaron un método de solución metaheurístico el cual se enfoca en el diseño del almacén y por consiguiente el

tipo de distribución que es un factor importante a la hora de minimizar las rutas y costos de la operación en general que es el tema que nos ocupa en particular el estudio tiene como objetivo modelar el problema de diseñar un almacén de varios niveles considerando los costos de manipulación en tres dimensiones. Una de las contribuciones del modelo propuesto es mejorar el diseño del almacén bidimensional (Bassan et al., 1980) al diseño de almacén de niveles múltiples considerando una estrategia de almacenamiento basada en clases que incluye tres tipos de productos paletizados, a saber, A, B y C. los autores exponen que la principal dificultad para resolver este tipo de problemas de diseño es luchar con la no linealidad en las variables y las limitaciones para encontrar una solución óptima, a su vez, dado que se demostró que el modelo propuesto era NP-hard, proponen cómo solución utilizar un algoritmo novedoso PSO que genera soluciones casi óptimas en poco tiempo, continuando con el tema de estudio se llevó a cabo el análisis del artículo publicado en la base de datos Web of Science por Theys et al., (2010), estos autores tratan el problema de secuenciación y distribución de los preparadores de pedidos en los sistemas de almacén de pasillos múltiples paralelos convencionales, para este problema de vendedor ambulante (TSP), los algoritmos exactos solo existen para almacenes con un máximo de tres pasillos transversales, mientras que para otros tipos de almacenes la literatura proporciona una selección de heurísticas de construcción dedicadas. Los autores informan ahorros promedio en la distancia de ruta de hasta un 47% cuando se utiliza la heurística TSP LKH (Lin – Kernighan – Helsgaun), el rendimiento de la LKH adaptada es en promedio más rápida que el algoritmo exacto y a su vez superior a las heurísticas disponibles en la literatura, cabe destacar que según lo antes interpretado se corrobora que las heurísticas generan mejores soluciones que los métodos exactos. Siguiendo el hilo conductor del tema de investigación propuesto, en el año 2010 se vuelve a aplicar el método metaheurístico antes mencionado en este caso para evitar la congestión entre recolectores que tiene como fin minimizar las rutas y por consiguiente los

costos implementados en el proceso económico, en el texto de Chen et al., (2013), buscan desarrollar un método de enrutamiento para controlar la congestión del recolector que desafía la suposición tradicional con respecto al sistema de preparación de pedidos de pasillo estrecho. Proponen un nuevo algoritmo de enrutamiento basado en Ant Colony Optimization (ACO) es un algoritmo metaheurístico que simula el comportamiento de las colonias de hormigas en la naturaleza, se utiliza comúnmente para resolver el problema del vendedor ambulante (TSP), para dos recolectores de pedidos (A-TOP) con consideración de congestión. También se analizan los impactos del diseño del almacén, el tamaño del pedido y la relación pick-time-walk-time en A-TOP y el rendimiento del sistema. A-TOP puede adaptarse a diferentes configuraciones de almacén. Los autores afirman que el tiempo medio de preparación y el tiempo medio de espera de dos preparadores de pedidos se seleccionan como criterios de rendimiento.

Reanudando la importancia del tipo de distribución del almacén para cumplir el objetivo común que corresponde a minimizar los costos de operación en las empresas, se encuentra un artículo de Jiayi et al., (2016) que definen un nuevo problema de asignación de almacenamiento dinámico (DSAP) y desarrolla un mecanismo integrado con fines de optimización, basado en la clasificación ABC y la afinidad mutua de productos. Se desarrolla una heurística basada en afinidad de productos (PABH), una técnica basada en la minería de datos, para calcular las relaciones por pares entre productos. Se muestra que el DSAP analítico y multiparamétrico es un problema de asignación cuadrática (QAP) y, por lo tanto, no determinista en tiempo polinómico (NP-Hard). Debido a la problemática encontrada por los autores desarrollaron un algoritmo genético codicioso (GA) para manejar dicha complejidad computacional del DSAP. En tal sentido es importante tomar en cuenta todas las variables que genera la actividad de recolección de pedidos, por lo tanto, en el año 2018 en el artículo tienen en consideración los múltiples recolectores que serían parte fundamental

puesto que aportan la mano de obra a la actividad en cuestión, en el artículo de Ardjmand et al., (2018), se desarrolló la asignación de pedidos, la preparación de pedidos por lotes y el enrutamiento de los recolectores en un gran almacén de preparación de oleadas de una importante empresa de logística de terceros de EE. UU. Desarrollaron un modelo matemático para el problema y se propusieron dos algoritmos (LD-PSO y PSA-ACO) para resolver el modelo. Los métodos propuestos se probaron con los datos obtenidos del almacén y se compararon con el algoritmo MMI que se utiliza en el almacén y un VND de última generación. Se observó que el LD-PSO sugerido es mucho más efectivo en términos de tiempo de cálculo que el método exacto. Además, se encontró que PSA-ACO supera a todos los demás algoritmos en términos de calidad de la solución y es bastante confiable para problemas a gran escala observados en el almacén, se puede deducir que es reiterativo que las heurísticas proporcionan mejores soluciones que los métodos exactos.

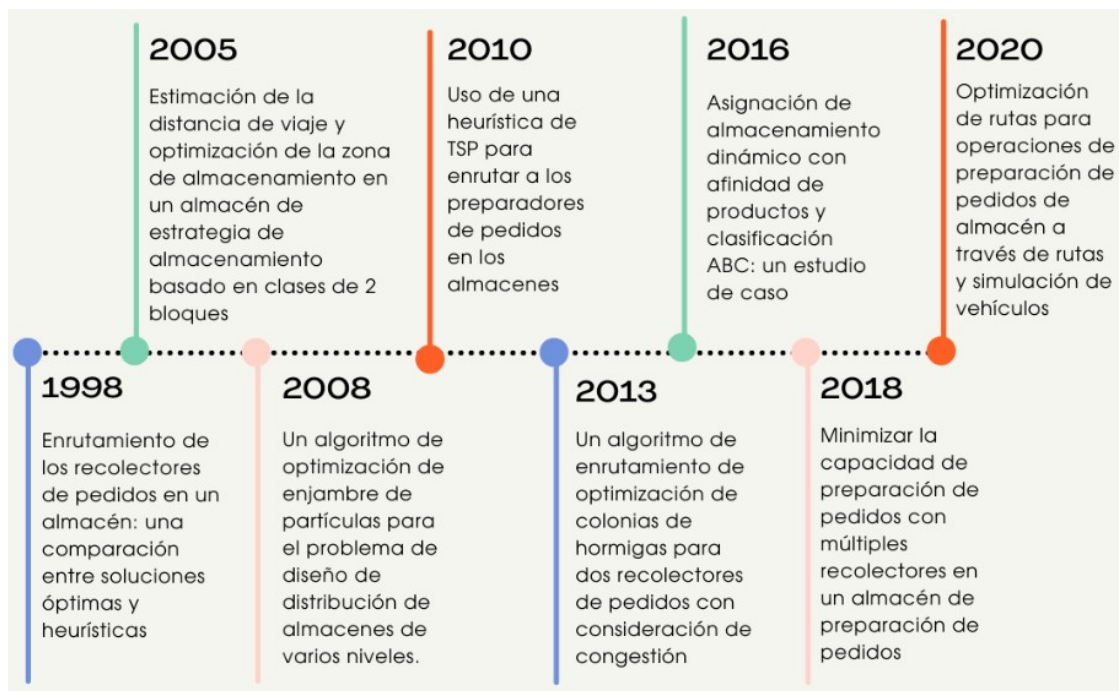
El documento publicado en el año 2020 reitera la importancia de tratar esta problemática vigente ya que al pasar los años los investigadores se ven más interesados con el tema, dejando a su vez paso a futuras investigaciones, lo antes mencionado por medio de artículos como el de Shetty, et al., (2020), proponen un enfoque simple pero efectivo que se basa en la formulación de un problema de generación de rutas de vehículos (VRP) siendo el objetivo de este estudio proponer una política de enrutamiento que minimice el tiempo / distancia total de viaje en el proceso de preparación de pedidos, lo que a su vez minimiza los costos operativos generales. Los autores lo lograron mediante optimización y simulación, seguido de análisis estadísticos y los resultados obtenidos muestran que el enfoque propuesto basado en VRP supera a los métodos de brecha más grande en forma de S, retorno, punto medio.

Por todo lo dicho, se puede concluir que en la mayoría de los artículos mencionados su principal objetivo es encontrar rutas eficientes de selección de pedidos para almacenes, y a

su vez para la solución de dicha problemática, hay tres documentos que concuerdan en comparar los métodos exactos con heurísticas afirmando que las soluciones factibles son mejores que las soluciones óptimas y dichos artículos fueron publicados en los años 2005, 2010 y 2018, después de este análisis a la literatura donde se reafirma las buenas soluciones que presentan las heurísticas, por esta razón se valida la investigación propuesta que está encaminada a comparar la forma de s y la brecha más grande.

Figura 16

Línea del tiempo de documentos relacionados al enrutamiento para la recolección de pedidos en un almacén convencional con líneas de dos bloques iguales.



4 Marco Teórico

El actual trabajo de investigación analiza el modelo de enrutamiento para la recolección de pedidos en un almacén convencional con líneas de dos bloques iguales y se busca solucionarlo mediante los algoritmos heurísticos S-shape y la brecha más grande. Por consiguiente, es importante definir algunos conceptos, para precisar la interpretación que tendrán estos términos en el proyecto.

4.1 Logística

Según el Instituto Colombiano de Automatización y Codificación Comercial (GS1 Colombia) es el proceso de planear, controlar y administrar la cadena de abastecimiento y distribución, desde el proveedor hasta el cliente y con un enfoque en la red de valor y colaboración entre los actores de la red logística interna y externa.

4.1.1 La logística de almacenamiento.

Se encarga de gestionar y planificar todo lo relativo a los elementos, mercancías o materias primas que una empresa recibe para realizar su actividad (Lopez, 2021).

Es decir, no solo tratan de almacenar, también tratan de que el almacenaje sea eficiente. por ejemplo, no tendría mucho sentido colocar y guardar todo perfectamente, pero desordenado, puesto que todo sería un completo desorden. Cabe aclarar que este tipo de logística se ejecutará en el caso de que la empresa tenga almacén. Ya que existen empresas que todo lo que reciben pasa directamente a producción.

las funciones que debe cumplir la logística de almacenamiento son:

- ❖ Actualizar los inventarios
- ❖ Registro del lugar en el que se encuentran los productos almacenados
- ❖ Planificar la zona de almacenamiento según el tipo de producto
- ❖ Facilitar la incorporación de los aprovisionamientos al proceso de producción
- ❖ Indicar cómo serán transportados cada uno de los aprovisionamientos

4.2 Almacenamiento

El almacenamiento es una parte esencial de la gestión de la cadena de suministro debido a sus importantes funciones, como almacenar piezas y materiales, así como productos terminados, y proporcionar un medio unificado y simplificado para consolidar materiales de proveedores de todo el mundo. Para mantenerse al día con la creciente competencia en la

industria y superar a los competidores, los almacenes deben realizar todas sus operaciones, por ejemplo, recepción, almacenamiento, cross-docking, preparación de pedidos y envío de la manera más eficiente para garantizar el buen funcionamiento de la cadena de suministro minimizando el costo (Shetty et al., 2020, introducción, párr.1).

4.2.1 Análisis ABC.

Diseñar una política de control de inventarios enfocada a cada producto resulta económicamente inviable, debido a esto se recomienda la implementación de métodos para la clasificación de productos como por ejemplo el análisis ABC. El análisis ABC permite la clasificación de los productos en tres grandes grupos: A, los más importantes; B, los importantes; y C, los menos importantes (Garza, 2018, p. 13).

De acuerdo con la literatura existen diversas estrategias para la clasificación de los productos, de tal forma que se beneficie toda la cadena de suministro. Por ejemplo, los productos se pueden clasificar basado en precio, valor, peso, demanda, rotación y disponibilidad (Garza, 2018, p. 14).

4.2.1.1 Métodos de solución.

Existen distintos métodos para la solución de problemas del tipo análisis ABC, entre los que destacan los siguientes:

4.2.1.1.1 Proceso de Jerarquía Analítica.

Este método es el de uso más común, se caracteriza porque puntúa cada tipo de ítem de inventario en cada criterio y luego combina las diferentes puntuaciones usando un esquema de ponderación subjetivo (Garza, 2018, p. 14).

4.2.1.1.2 Optimización Lineal.

Este método resuelve un problema de programación lineal para cada elemento del inventario para determinar pesos que maximizan la puntuación ponderada para ese artículo sujeto a restricciones que la suma ponderada para cada elemento que utiliza este mismo conjunto de

pesos es menor o igual a uno. Por lo tanto, una crítica inmediata de este modelo es que, con más de un puñado de elementos, el proceso se volverá tedioso y requiere mucho tiempo para su solución (Garza, 2018, p. 14).

4.2.1.1.3 *Redes Neuronales.*

Para este método, se sigue un proceso similar al de los algoritmos genéticos, pero utilizan redes neuronales artificiales para resolver un problema de clasificación de inventario con cuatro criterios: precio unitario, costo de pedido, rango de demanda y tiempo de entrega. Las entradas a la red son valores de estos criterios para diferentes ítems de inventario. La salida de la red es una categorización de un conjunto de valores de criterios como A, o B, o C (Garza, 2018, p. 14).

4.2.1.1.4 *Agrupación.*

Considera el análisis de ABC como un problema de agrupación en el que los elementos de inventario que tienen que ser categorizados se dividen en tres clústeres difusos, minimizando una función de agrupación apropiada. (Garza, 2018, p.14)

4.3 Preparación de pedidos

La preparación de pedidos se define comúnmente como el proceso de recuperar artículos de sus ubicaciones de almacenamiento en respuesta a los pedidos de los clientes, se considera uno de los que más tiempo y trabajo requieren. Algunos autores estimaron que representa hasta el 55% de los costos operativos totales del almacén (Tompkins et al., 2010), lo que ilustra que la preparación de pedidos es una palanca importante para aumentar la eficiencia del almacenamiento. En la práctica, la mayoría de los almacenes de preparación de pedidos se operan de acuerdo con el principio de picker-to-parts y con una alta proporción de trabajo manual (De Koster et al., 2007; Van Gils et al., 2018), principalmente porque los humanos pueden reaccionar de manera más flexible a los cambios que ocurren en el proceso

de preparación de pedidos que las máquinas debido a sus habilidades cognitivas y motoras (Grosse et al., 2015, 2017)

4.4 Optimización de rutas de “Picking”

“El proceso de optimización de “picking” requiere del modelaje de un sistema geométrico adecuado, el cual corresponda a una ruta de viaje dentro de un almacén” (Garza, 2018, p. 14).

El propósito principal de la optimización de los procesos de “picking” es la mejora en el nivel de servicio hacia los clientes, así como la reducción de costos mediante la eliminación de actividades que no generan valor en el proceso. Las ventajas de la optimización del proceso de “picking” guardan una alta relación con el grado de complejidad de la ruta trazada, mientras que su impacto se ve mermado o beneficiado por el grado de involucramiento del “picker” sobre el proceso (Garza, 2018, p. 13).

Algunos de los objetivos principales que se buscan a la hora de implementar el sistema de recolección de pedidos son los siguientes, minimizar los tiempos de traslado promedio, maximizar el uso de los espacios en el almacén y minimizar el tiempo de procesamiento de una orden (Garza, 2018).

De igual manera las empresas toman algunas decisiones sobre el diseño que tendrá la bodega y el control de sistemas de recolección de pedidos a nivel táctico y operativo, las cuales son, diseño del layout y sus respectivas dimensiones, asignación de productos en los estantes, asignar órdenes para recoger los pedidos y rutina para surtir la bodega (Garza, 2018).

4.5 Diseño del almacén

El diseño del almacén tiene en cuenta el tipo general de almacén considerado, el número y la ubicación de los depósitos y varias características de los pasillos. En cuanto al

tipo de almacén, la literatura discutió tres variantes principales de almacén (Makusee et al., 2010, características del problema, párr.2).

4.5.1 Almacenes convencionales.

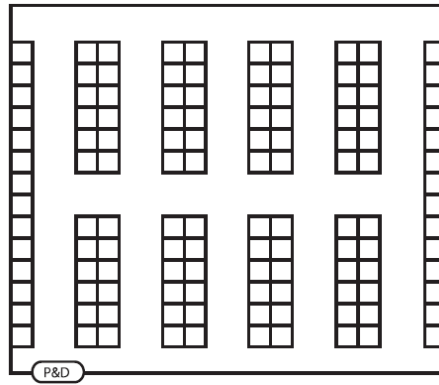
Los almacenes convencionales tienen una forma rectangular con pasillos de picking paralelos que son perpendiculares a un cierto número de pasillos transversales rectos. Los almacenes convencionales con dos pasillos transversales en los extremos delantero y trasero a menudo se denominan almacenes de un solo bloque, mientras que los almacenes con más de dos pasillos transversales a menudo se denominan almacenes de bloques múltiples, donde cada bloque del almacén consta de varios pasillos secundarios (Makusee et al., 2010, características del problema, párr.3).

4.5.1.1 Almacén de dos bloques iguales.

Contiene un pasillo transversal adicional a los dos pasillos transversales, en la parte delantera y trasera que pasa por el centro del almacén. Al dividir el espacio de recolección en dos partes iguales, este pasillo transversal central aumenta la cantidad de oportunidades para que los trabajadores cambien de pasillo. Cuando se visita más de una ubicación en un solo recorrido, tener pasillos transversales adicionales en un almacén puede reducir las distancias de viaje entre ubicaciones al aumentar la cantidad de opciones de ruta (Ozturkoglu & Hoser, 2018, introducción, párr.3).

Figura 17

Diseño almacén de dos bloques iguales



Tomado de “a discrete cross aisle design model for order-picking warehouses” (p.413), por O. Ozturkoglu y D. Hoser, 2019, Elsevier.

4.5.2 Almacenes no convencionales.

Los almacenes no convencionales no disponen todos los pasillos de picking o pasillos transversales en paralelo entre sí, sino que seleccionan un diseño diferente para facilitar el acceso a determinadas regiones del almacén o para mejorar la utilización del espacio. Los ejemplos incluyen la espina de pescado y la V voladora (Çelik y Süral, 2014) y los diseños en forma de U (Glock y Grosse, 2012) (Makusee et al., 2010, características del problema, párr.4).

4.5.3 Almacenes generales.

Los modelos de almacenes generales no hacen suposiciones sobre los pasillos del almacén, sino que utilizan matrices de distancias generales. Como resultado, no es posible utilizar matrices de distancia especialmente estructuradas como en el trabajo de RR, por ejemplo, lo que dificulta la solución eficiente del problema de enrutamiento de los preparadores de pedidos en estos almacenes. El problema resultante es idéntico al TSP o CVRP clásico (Makusee et al., 2010, características del problema, párr.5).

El diseño del almacén define el número y la ubicación de los depósitos, así como las características de los pasillos. En la literatura se analizaron tanto los almacenes de depósito

único como los de varios depósitos con pasillos anchos y estrechos. En los almacenes con pasillos estrechos, por ejemplo, el preparador de pedidos puede recoger artículos de ambos lados del pasillo sin tener que cruzarlo, mientras que, en los almacenes de pasillos anchos, el picking de ambos lados del pasillo hace que sea necesario cruzar el pasillo, lo que lleva a un adicional. distancia de viaje. Si el almacén utiliza estanterías de almacenamiento de bajo nivel, los artículos se pueden recoger directamente de las estanterías sin necesidad de desplazamientos verticales (Scholz y Wäscher, 2017), mientras que en el caso de racks de almacenamiento de alto nivel, también pueden ser necesarios movimientos verticales. El primer almacén generalmente se conoce como un sistema de preparación de pedidos de bajo nivel, mientras que el segundo se conoce como un sistema de alto nivel (Makusee et al., 2010, características del problema, párr.6).

4.6 Optimización combinatoria

Los problemas de optimización combinatoria presentan complejidad a la hora de resolverse debido a la cantidad de soluciones factibles que se tienen (García, 2016, optimización combinatoria, párr.2).

Un problema de optimización combinatoria es un problema de optimización en el cual el espacio de soluciones posibles es discreto. La optimización combinatoria es una rama de la optimización de las matemáticas aplicadas fuertemente relacionada con la investigación operativa, la teoría algorítmica y la teoría de la complejidad computacional. Los algoritmos de optimización combinatoria se relacionan con problemas Np Hard. Estos son los modelos más complejos que se encuentran en la investigación de operaciones, debido en gran parte a su tamaño; además no existe un método que garantice soluciones óptimas, es decir, solo se logran soluciones factibles (García, 2016, optimización combinatoria, párr.2).

4.6.1 *Problema del agente viajero.*

Quizá el problema clásico de optimización combinatoria más famoso es conocido como el problema del agente viajero. Recibió este nombre pintoresco porque puede describirse en términos de un agente de ventas que debe visitar cierta cantidad de ciudades en un solo viaje. Si comienza desde su ciudad de residencia, el agente determinará cuál ruta debe seguir para visitar cada ciudad exactamente una vez antes de regresar a su casa de manera que se minimice la longitud total del viaje (Lieberman, 2017), el Steiner TSP es un problema de optimización combinatoria NP-hard y los algoritmos exactos solo están disponibles para almacenes que constan de dos y tres bloques. En un artículo fundamental de Ratliff y Rosenthal (1983) proponen un algoritmo exacto para la configuración de bloque único, basado en subgrafos de recorrido parcial y siete clases de equivalencia. Roodbergen y De Koster (2001) extienden este algoritmo exacto a la configuración del almacén con tres pasillos transversales. Para los almacenes con tres o más bloques, no se dispone de un algoritmo exacto hasta la fecha, por lo que la atención científica se ha dedicado en gran medida a encontrar heurísticas eficientes para determinar la ruta más adecuada para el preparador de pedidos. El problema del agente viajero se complica con rapidez a medida que aumenta el número de ciudades (Theys et al., 2010, descripción el problema y revisión de literatura, párr.3). En el caso de un problema con n ciudades y una ligadura entre cada par de ellas, el número de rutas factibles que debe considerarse es $(n - 1)!/2$. El denominador de 2 surge porque cada ruta tiene una vía inversa equivalente con la misma distancia. Así, mientras un problema del agente viajero con 10 ciudades tiene menos de 200.000 soluciones factibles que deben ser consideradas, y un problema con 15 ciudades tiene alrededor de 10^{10} soluciones factibles; se puede concluir que al aumentar el número de ciudades mayor serán las soluciones factibles que se generan, teniendo en cuenta lo anterior se desencadena la enorme dificultad para resolver grandes problemas de este tipo por lo tanto, los métodos

heurísticos guiados por metaheurísticas son una forma popular de enfrentar tales problemas (Lieberman, 2017).

4.6.2 Teoría de la complejidad computacional.

La optimización computacional incluye las disciplinas de investigación operativa para modelar el sistema, matemáticas para formular el modelo, ciencias de la computación para el diseño y análisis de algoritmos e ingeniería del software para implementar el modelo. Matemáticamente, los problemas pueden caracterizarse atendiendo a la dificultad que entraña su resolución por un ordenador. (Niño, Vargas, 2018, p.35).

Esta teoría se centra en clasificar los problemas computacionales acorde a su dificultad, y sus clases según Sipser (2013) son:

- Clase P: básicamente comprende a todos los problemas que se pueden resolver por un programa razonablemente rápido, problemas como multiplicación, laberintos y ordenación. La P proviene de que el tiempo en que son resueltos estos problemas en una máquina de Turing determinista es de comportamiento polinomial (*Polynomial time*). Esta clase se conoce como una clase robusta que no es afectada por las particularidades del modelo computacional que se aborde y cuyos problemas se solucionan de forma realista en computador (Rivera & Jaramillo, 2020, p.30).
- Clase NP: Esta clase es de mayor complejidad puesto que contiene todos los problemas de la clase P, pero también abarca muchos otros importantes como, por ejemplo: ruteo vehicular, planificación de trabajo, diseño de circuitos y plegamiento de proteínas. Estos problemas tienen la característica de que, a pesar de tomar una gran cantidad de tiempo para encontrar una solución al problema, esta se puede corroborar en un tiempo razonable, es decir, estos problemas tienen verificadores de tiempo polinomial. NP proviene de que el tiempo en el que son resueltos estos

problemas en una maquina de Turing no determinística es polinomial (*Nondeterministic Polynomial time*) (Rivera & Jaramillo, 2020, p.30).

- Clase NP-Complete: Es un subgrupo de NP que abarca a todos los problemas esencialmente iguales, con algunas complicaciones en sus tiempos polinomiales lo cual los hace más difíciles que los NP. Algunos problemas ubicados acá son el sudoku, el plegamiento de las proteínas, el emparejamiento 3D, el knapsack problem y el satisfiability problem (Rivera & Jaramillo, 2020, p.31).
- Clase NP-Hard: Son problemas al menos tan difíciles como los problemas en NP y su alta complejidad radica en que en los problemas NP-Hard, a diferencia de los NP, los tiempos de solución como los tiempos de verificación crecen exponencialmente con el tamaño del problema y también en que algunos de estos problemas son de complejidad desconocida. Algunos ejemplos de estos problemas son: el ajedrez, el TSP y el problema de la suma de subconjuntos. (Rivera & Jaramillo, 2020, p.31).

4.7 Algoritmos de Solución

4.7.1 Algoritmos exactos.

Los algoritmos consisten en un conjunto ordenado de pasos que aseguran la solución correcta a un problema, permiten describir una serie de instrucciones que debe realizar un computador para lograr un resultado. En el caso de los algoritmos exactos o de búsqueda exhaustiva se caracterizan por ser propios de cierto grupo de problemas, no presentan un alto grado de complejidad y proporcionan soluciones óptimas dentro de un conjunto de soluciones potenciales. Un ejemplo de este tipo de método se presenta en De Koster y Van der Poort (1998); donde construyen un algoritmo de programación dinámica con el propósito de calcular recorridos mínimos de selección de pedidos en almacenes con hasta tres pasillos transversales (Merlano y Castellanos, 2014, p.62).

Otro ejemplo de este tipo de método es la búsqueda con retroceso o backtracking, que trabaja tratando continuamente de extender una solución parcial. En cada etapa de la búsqueda, si una extensión de la solución parcial actual no es posible, se va hacia atrás para una solución parcial corta y se trata nuevamente, (Merlano y Castellanos, 2014, p.62).

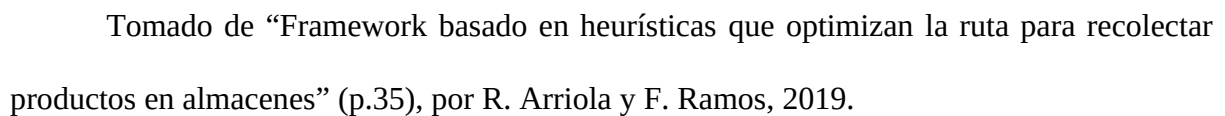
4.7.2 Heurística.

Se denomina heurística al arte de inventar. En programación se dice que un algoritmo es heurístico cuando la solución no se determina en forma directa, sino mediante ensayos, pruebas y reensayos. El método consiste en generar candidatos de soluciones posibles de acuerdo con un patrón dado; luego los candidatos son sometidos a pruebas de acuerdo con un criterio que caracteriza a la solución. Si un candidato no es aceptado, se genera otro; y los pasos dados con el candidato anterior no se consideran. Es decir, existe inherentemente una vuelta atrás, para comenzar a generar un nuevo candidato; por esta razón, este tipo de algoritmo también se denomina "con vuelta atrás" (Chavarria y Zuñiga, 2019, p.25).

4.7.2.1 S-Shape.

Se puede considerar como la heurística de enrutamiento más básica. Consiste en que todos los subpasillos con producto se deben atravesar completamente, iniciando cada uno desde el pasillo de cruce donde finalizó el anterior, tomando así la forma de "S". Los subpasillos sin producto a recoger se omiten. El recolector debe iniciar por recorrer completamente el pasillo con producto que esté en el extremo izquierdo o derecho, según sea el más cercano al punto de inicio hasta llegar al pasillo de cruce posterior del almacén. A partir de ahí se visitan uno a uno los subpasillos pertenecientes al bloque más lejano hasta terminar en el extremo contrario del almacén. El único caso en donde no es necesario atravesar completamente un subpasillo es cuando éste es el último del bloque, en este caso se recoge el último producto que contiene y se regresa al pasillo de cruce de donde se partió. Al

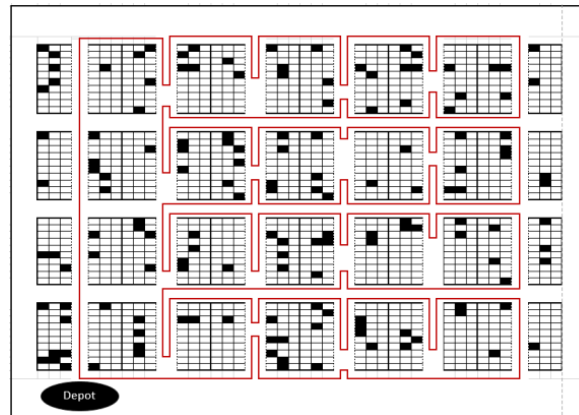
Ejemplo recolección de una ruta s-shape



Esta heurística consiste en identificar cual es la brecha más larga en cada subpasillo y evitar recorrerla. La brecha puede ser ya sea entre el pasillo de cruce superior y el primer producto a recoger, entre productos adyacentes o del último producto del subpasillo al pasillo de cruce inferior. Todos los productos que se encuentren por encima de la brecha más larga serán tomados por el pasillo de cruce superior y el recolector deberá regresar al pasillo de cruce por donde ingresó y debe hacer lo mismo hasta explorar todos los subpasillos del bloque, para luego tomar todos los productos restantes desde el pasillo de cruce inferior. Los únicos subpasillos que se atraviesan completamente son los pertenecientes al primer pasillo que se encuentra al extremo izquierdo o derecho que se esté más cerca del punto de inicio, y el ultimo de cada bloque (de esta forma se pasa de un pasillo de cruce a otro). Al terminar de recoger todos los productos se debe regresar al depot. (Arriola y Ramos, 2019, p.35).

Figura 19

Ejemplo recolección de una ruta la brecha más grande



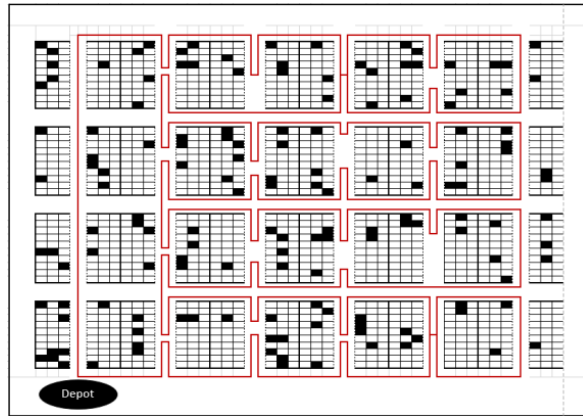
Tomado de “Framework basado en heurísticas que optimizan la ruta para recolectar productos en almacenes” (p.36), por R. Arriola y F. Ramos, 2019.

4.7.2.3 Midpoint.

Es una política de enrutamiento similar a Largest Gap con la diferencia de que aquí se identifica el centro de cada subpasillo con producto y el recolector en primera instancia toma únicamente los productos que se encuentran en la mitad superior para luego recolectar los productos restantes desde el pasillo de cruce inferior. En caso de que el producto se encuentre exactamente en el centro se toma desde cualquiera de los dos pasillos de cruce. Al terminar de recolectar todos los productos se debe regresar al depot. (Arriola y Ramos, 2019, p.36).

Figura 20

Ejemplo recolección de una ruta midpoint



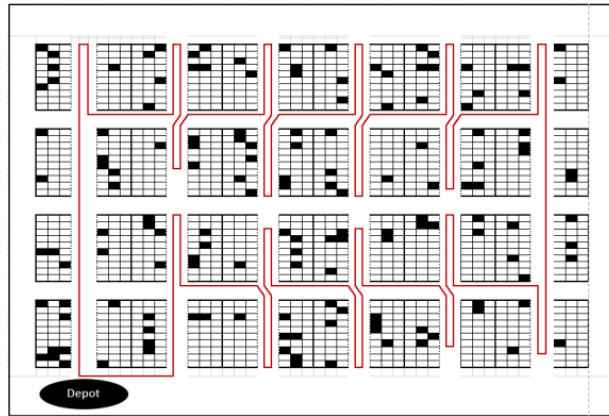
Tomado de “Framework basado en heurísticas que optimizan la ruta para recolectar productos en almacenes” (p.37), por R. Arriola y F. Ramos, 2019.

4.7.2.4 Return.

Esta política de enrutamiento consiste en que al explorar los subpasillos, el recolector entra y sale por el mismo pasillo de cruce, es decir, al tomar el último elemento regresa para luego continuar con el próximo subpasillo. En caso de que la configuración del almacén contenga más de un bloque, el recolector visita los subpasillos de los dos bloques adyacentes al pasillo de cruce alternadamente. Si el número de bloques es superior a tres, al finalizar con ambos se debe trasladar al pasillo de cruce el cual sea adyacente a los siguientes bloques sin explorar. Al finalizar se debe regresar al depot. (Arriola y Ramos, 2019, p.37).

Figura 21

Ejemplo recolección de una ruta return



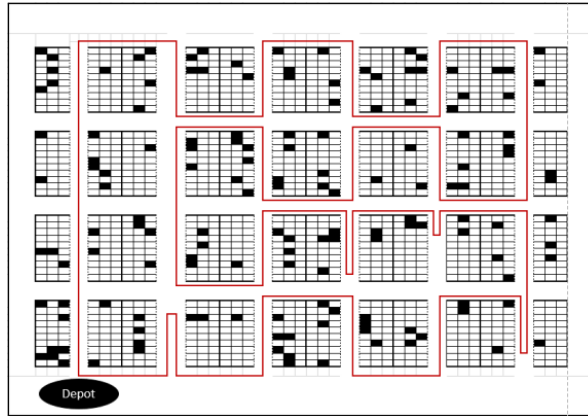
Tomado de “Framework basado en heurísticas que optimizan la ruta para recolectar productos en almacenes” (p.38), por R. Arriola y F. Ramos, 2019.

4.7.2.5 Combined.

En esta heurística, el recolector siempre recoge todos los elementos contenidos en el subpasillo, solo que, al recoger el último debe decidir entre (1) continuar por el pasillo de cruce frontal, o (2) regresar al pasillo posterior. Esta decisión se toma según la distancia más corta al siguiente nodo con producto dentro del mismo bloque. El recolector debe iniciar por recorrer completamente el primer pasillo de recolección hasta llegar al pasillo de cruce posterior del almacén. A partir de ese punto se recorren los subpasillos por bloque hasta llegar al pasillo de cruce frontal y de esta forma regresar al depot. (Arriola y Ramos, 2019, p.38).

Figura 22

Ejemplo recolección de una ruta combined



Tomado de “Framework basado en heurísticas que optimizan la ruta para recolectar productos en almacenes” (p.39), por R. Arriola y F. Ramos, 2019.

4.7.3 Metaheurística.

El término metaheurística se obtiene de anteponer a heurística el sufijo “meta” que significa “más allá” o “a un nivel superior”. Los conceptos actuales de lo que es una metaheurística están basados en las diferentes interpretaciones de lo que es una forma inteligente de resolver un problema. Las metaheurísticas son: estrategias inteligentes para diseñar o mejorar procedimientos heurísticos muy generales con un alto rendimiento (Belen et al., s.f)

- **Algoritmo genético:** Se encuentran dentro de los algoritmos evolutivos e imitan aspectos del comportamiento humano, tales como el aprendizaje, la percepción, la evolución y la adaptación (Merlano y Castellanos, 2014, p.66).
- **Optimización de enjambre de partículas:** Es usado para resolver problemas no lineales y está orientado a encontrar mínimos o máximos globales (Merlano y Castellanos, 2014, p.66)
- **Optimización por colonia de hormigas:** Es un algoritmo de tipo poblacional y constructivo, se inspiran directamente en el comportamiento de las colonias reales de

hormigas para solucionar problemas de optimización combinatoria (Merlano y Castellanos, 2014, p.67).

- **Recocido simulado:** Ha sido empleado para resolver problemas combinatorios. La idea surge del proceso físico conocido como recocido, en el cual se eleva la temperatura de un sólido hasta el punto de que se vuelve líquido, a continuación, la temperatura se disminuye de forma paulatina para obtener una estructura cristalina sin defectos (estado basal) (Merlano y Castellanos, 2014, p.68).
- **Búsqueda tabú:** Se caracteriza por el uso de memoria adaptativa y estrategias especiales de resolución de problemas. Ya que este tipo de metaheurística es destacado por resolver problemas de optimización duros (NP- Hard), se ha incrementado el número de aplicaciones de búsqueda Tabú durante los últimos años (Merlano y Castellanos, 2014, p.68).

4.8 Herramienta computacional python

Es un lenguaje de programación multiplataforma y de código abierto que puede utilizarse tanto para desarrollo web, creación de software y procesamiento de datos, entre muchos otros propósitos. Esta versatilidad y facilidad para aprenderlo (es ampliamente considerado el lenguaje más sencillo de aprender) lo han convertido en el lenguaje de programación más popular del mundo, Según el índice PYPL.

Python se basa en los lenguajes C y C++ y tiene sus raíces en el sistema operativo UNIX. Python existe desde hace años, pero no fue hasta mediados de la década de 2000 cuando se afianzó en el mundo del desarrollo web, con el auge de sitios como WordPress.

5 Metodología

5.1 Fase 1. Realizar una revisión bibliográfica en general sobre el problema a tratar

- Revisión de literatura sobre el picking routing problem warehouse

- Revisión de literatura sobre los métodos de solución para el problema de la recolección de pedidos

5.2 Fase 2. Definir las características del problema

- Seleccionar e identificar el diseño de almacén más utilizado para la recolección de pedidos
- Decidir la cantidad de recolectores que realizarán la recolección de pedidos
- Determinar el número de depósitos a utilizar para la recolección de pedidos

5.3 Fase 3. Adaptar un modelo matemático

- Adaptar un modelo que represente el problema de recolección de pedidos teniendo en cuenta

Función objetivo: Minimizar las distancias totales en las rutas de los recolectores.

Variables de decisión

- Número de recolectores
- Ruta para la recolección de pedidos utilizando la clasificación ABC.
- Pedidos Heterogéneos o homogéneos.
- Capacidad de los recolectores

Restricciones

- Metros cuadrados del almacén
- Capacidad máxima del recolector
- Único deposito
- Ancho de los pasillos

- Establecer hipótesis y probar su veracidad con el lenguaje de programación Python
- Hacer comparaciones de los datos obtenidos entre los algoritmos S-Shape y la brecha más grande y así poder comprobar la coherencia del modelo adaptado, teniendo en cuenta las características definidas en el proyecto
- Si los datos no se ajustan a lo esperado se debe ir ajustando el modelo matemático

5.4 Fase 4. Definir y desarrollar los algoritmos a usar

- Selección de los algoritmos entre los ya existentes identificados en la revisión de literatura relacionada con el problema de recolección de pedidos

5.5 Fase 5. Evaluar los algoritmos

- Buscar instancias en las que se haya abordado el problema de enrutamiento para hacer contraste con el modelo adaptado en esta investigación.
- Probar el algoritmo por medio del software de programación Python.
- Comparar las soluciones factibles generadas en las investigaciones encontradas con las arrojadas por el modelo matemático desarrollado en el proyecto, teniendo como criterio los tiempos de cómputo más pequeños y las mínimas distancias.

5.6 Fase 6. Documentación

- Elaboración del documento de proyecto de grado
- Escritura del artículo de carácter publicable con la información destacada de la investigación y los resultados obtenidos.

6 Descripción del problema y modelo matemático

6.1 Descripción del problema

Se considera un almacén convencional de dos bloques iguales con un único deposito, donde se van a hacer variaciones en el número de recolectores, los cuales transportan los artículos demandados por medio de carros teniendo en cuenta la capacidad máxima, con respecto al tipo de almacenamiento se lleva a cabo la clasificación ABC, según la empresa Mecalux (2020) afirma que la clasificación ABC consiste en organizar la distribución de las distintas mercancías dentro del almacén a partir de su relevancia para la empresa, de su valor

y de su rotación. Con este sistema se prioriza la adquisición y colocación de los productos no por su volumen o cantidad, sino por el aporte económico que suponen para las empresas. Las referencias se clasifican en tres niveles:

1. Artículos con rotación A:

En cantidad, suelen ocupar el 20% de los inventarios, pero son los que más rotación experimentan y, por tanto, tienen una importancia estratégica, las referencias A son los productos en los que la empresa tiene invertido más presupuesto y generan el 80% de los ingresos, a la hora de ubicar estas referencias en el almacén, tienden a situarse en zonas bajas, de acceso directo y fácil para el operario.

2. Artículos con rotación B:

Comprenden la franja de rotación media y suelen representar, en cantidad, el 30% de los inventarios, estos artículos se renuevan con menos velocidad, por lo que su valor y relevancia es menor frente a los productos A, en este caso, hay que prestar atención a la evolución de las referencias clasificadas como B por si pueden dar el salto a la rotación A o, en cambio, convertirse en productos C, en el almacén, se ubican en zonas de altura intermedia cuyo acceso no es tan directo como en las posiciones que ocupan los productos A, pero tampoco resultan ser las más inaccesibles.

3. Artículos con rotación C:

En su conjunto, los productos C son los más numerosos, llegando a suponer el 50% de las referencias almacenadas. Sin embargo, también son los menos demandados por parte de los clientes, en la instalación de almacenaje, como se necesita acceder a ellos de manera esporádica, ocupan las zonas más altas o menos accesibles.

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones se quiere llegar a una solución que defina la ruta de los recolectores en el almacén con un tiempo mínimo de cómputo y la mínima distancia recorrida.

El problema reside en la programación para un conjunto de P pedidos $p = \{1, 2, \dots, p\}$, donde los productos están ubicados en un conjunto V de posiciones $V = \{1, 2, \dots, v\}$ dentro del almacén y son almacenados en un conjunto S de SKU o unidades de almacenamiento $S = \{1, 2, \dots, s\}$.

Considerando el impacto del costo en tiempo de desplazamiento en la operación de un almacén y el costo de encontrar la solución más factible, se han desarrollado técnicas heurísticas que permiten organizar la ruta para la recolección de pedidos de una orden que ayudan a disminuir el tiempo de recorrido (Scholz, Schubert, & Wäsher, 2017). Cada una de estas estrategias intuitivas tienen distinto coste en tiempo de recorrido y en general no obtienen el tiempo óptimo. Sin embargo, son muy usuales en la práctica debido al bajo costo de implementación y tiempo requerido para la planificación (Vargas et al., 2020).

Las dos heurísticas que se utilizan en esta investigación son las siguientes:

- **S-shape**

La estrategia en forma de S también se llama estrategia transversal conduce a una ruta en la que los pasillos, que deben ser visitados se recorren completamente. Se omiten los pasillos donde no hay nada que recoger. Por lo tanto, los pasillos se visitan en forma de S. El recolector ingresa así a un pasillo desde un extremo y sale del pasillo desde el otro extremo, comenzando en el lado izquierdo del almacén. Después de elegir el último artículo, el preparador de pedidos regresa al frente del pasillo. Esta estrategia se usa con frecuencia, porque es muy simple de usar y entender (Vargas et al., 2020).

- **La brecha más grande**

En la estrategia la brecha más grande se recorre completamente el primer y último pasillo que contengan productos a recolectar. El recolector recorre los otros pasillos sin atravesar el mayor espacio entre cada par de productos vecinos a recoger dentro del mismo pasillo, a este espacio se le conoce como la brecha más grande. Esta heurística es especialmente útil cuando el tiempo para cambiar pasillos es corto y el número de selecciones por pasillo es bajo (Vargas et al., 2020).

6.2 Modelo Matemático

6.2.1 *Formulación del problema*

Índices

Los índices del modelo son:

K: conjunto de SKU

O: número de órdenes de pedido

s: depósito

i: posición actual del recorrido

v: posición inicial de alistamiento del pedido

Parámetros

P: conjunto de items existentes en el almacén

L: conjunto de localizaciones

Pos: conjunto de posiciones de almacenamiento

B: capacidad de carro de picking

γ_v : número de elementos almacenados en la posición de almacenamiento v

a_{os} : cantidad de artículos de SKU s exigido por orden O.

D_{ij} : Distancia entre las posiciones i y j

T: conjunto de carros o recolectores disponibles

Consideraciones

-Se establece una cantidad de carros suficiente para recolectar todas las órdenes (Pascual,2019).

-La orden puede estar compuesta por varios ítems; pero en ningún caso puede superar la capacidad del carro (Pascual,2019).

-Se considera un almacén convencional con dos bloques iguales compuesto de pasillos rectos con estanterías de almacenaje que se apilan a su vez verticalmente en distintas alturas, considerando un almacenamiento (ABC) (Pascual,2019).

-Cada recolector se le asigna un único carro, es decir que recolector es igual a carro (Pascual,2019).

-El carro tendrá una capacidad fija, independientemente de la forma o tamaño de los items (Pascual,2019).

-Se considera dato todo aquello que define el problema que se pretende abordar. Para el problema trabajado se definen los siguientes datos y conjuntos de datos:

- Conjunto P: hace referencia al conjunto de productos existentes en el almacén. Todos ellos tienen un espacio de almacenamiento asignado y conocido (Pascual,2019, Conjunto de datos del problema, párr.3).

- Conjunto L: hace referencia al conjunto de localizaciones (posiciones en el centro del pasillo) desde las cuales el recolector puede alcanzar una serie determinada de productos ubicados a ambos lados (Pascual,2019, Conjunto de datos del problema, párr.4).

-En el grafo que define el problema, los nodos serán un conjunto compuesto de dicho conjunto de localizaciones L además de:

- El nodo origen, representado como $\{s\}$, que será punto de partida y de retorno para todos los carros utilizados (Pascual,2019, Conjunto de datos del problema, párr.6).

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

- Una serie de localizaciones artificiales LA, que conectan los nodos del conjunto L para formar el layout del almacén, pero desde los cuales no se alcanza ningún producto. Representa los cruces de pasillos y/o subpasillos (Pascual,2019, Conjunto de datos del problema, párr.7).

-Los nodos, también denominados vértices, que componen el grafo son los siguientes (Pascual,2019, Conjunto de datos del problema, párr.8).

$$V = \{L, LA, s\}$$

- Conjunto Pos: hace referencia al conjunto de posiciones de almacenamiento disponibles (ABC), dónde se almacenan, o no, productos. Desde cada localización L se podrán alcanzar un subconjunto de posiciones. Cómo se ha mencionado en la definición del conjunto P, cada producto tiene asignado su posición de almacenaje y son previamente conocidas (Pascual,2019, Conjunto de datos del problema, párr.9).

- Conjunto O: hace referencia al conjunto de órdenes que se reciben por parte de los clientes y de las cuales deben recogerse todos los productos que las componen. Se representará mediante el índice 'o', es decir, PO será el subconjunto de productos P que componen el pedido o, y a su vez LO representará el subconjunto de localizaciones L desde las que se alcanzan todos los PO (Pascual,2019, Conjunto de datos del problema, párr.10).

- Dij: hace referencia a la distancia que hay entre el nodo i y el nodo j del grafo, es decir, distancias entre posiciones consecutivas del almacén. Esta matriz de datos es la que define el Layout del almacén. Se trata de una matriz simétrica, ya que para cada arco i-j existe otro arco j-i tal que $d_{ij} \equiv d_{ji}$. Todas las distancias han de ser positivas o cero en caso de

que no exista conexión entre los nodos implicados (Pascual,2019, Conjunto de datos del problema, párr.11).

- Parámetro B: Capacidad de los carros, es decir, el peso máximo que pueden almacenar en un mismo recorrido, carro o recolector. Es conocido y fijado al inicio del problema (Pascual,2019, Conjunto de datos del problema, párr.12).

- Conjunto T: hace referencia al conjunto de carros o recolectores disponibles. Se representa mediante el índice 't'. En nuestro caso se define de la siguiente manera (Pascual,2019, Conjunto de datos del problema, párr.13).

$$T = \frac{\sum_{o \in O} b_o}{B} + 0,2$$

Además, de los conjuntos previamente definidos se obtiene una serie de datos adicionales como son los siguientes:

- Número de pedidos a recoger.
 - El código de identificación de cada producto demandado dentro de cada pedido.
 - Las cantidades que se demanda de cada producto dentro de cada pedido
- (Pascual,2019, Conjunto de datos del problema, párr.14).

Variables

Las variables involucradas en el problema que se estudia son las que se definen a continuación (Pascual,2019, Variables que intervienen en el problema, párr.2).

- Zot: se trata de una variable binaria. Su valor en la solución determina el carro que recoge el pedido. Si esta variable Zot vale 1, es decir, se activa, indicará que el pedido 'o' es asignado al carro 't'. Si por el contrario el valor que toma la variable es 0, es decir, no se

activa, el pedido 'o' no será asignado al carro 't' (Pascual,2019, Variables que intervienen en el problema, párr.3).

- X_{tij} : se trata de una variable binaria. Su valor en la solución determina la ruta que realiza cada carro. Si esta variable X_{tij} vale 1, es decir, se activa, indicará que el carro 't' recorre el arco descrito por los nodos consecutivos i-j, donde 'i' representa el nodo de inicio y 'j' el nodo de salida. Si por el contrario el valor que toma la variable es 0, es decir, no se activa, el arco i-j no formará parte del recorrido del carro 't' (Pascual,2019, Variables que intervienen en el problema, párr.4).

- Y_{ti} : se trata de una variable binaria. Su valor en la solución determina los nodos visitados por cada carro. Si esta variable Y_{ti} vale 1, es decir, se activa, indicará que el carro 't' visita el nodo 'i'. Si por el contrario el valor que toma la variable es 0, es decir, no se activa, el nodo 'i' no será ninguno de los nodos visitados por el carro 't' (Pascual,2019, Variables que intervienen en el problema, párr.5).

- E_{tij} : Se trata de una variable binaria. Se ha definido de manera auxiliar para indicar que un carro recorre el camino entre dos nodos consecutivos i-j, sin tener en cuenta en qué dirección se realice el movimiento. Si esta variable E_{tij} vale 1, es decir, se activa, indicará que el carro 't' recorre el arco i-j y/o el arco j-i. El orden de los subíndices de la variable no indica en este caso el orden de visita (Pascual,2019, Variables que intervienen en el problema, párr.6).

- G_{ti} : se trata de una variable entera. Su valor en la solución determina el grado de cada nodo para el recorrido de cada carro. El grado de un nodo o vértice, tal y como se muestra en la siguiente imagen, indica el número de arcos parten de él. El valor entero que tome la variable G_{ti} indicará el número de arcos que recorre el carro 't' con nodo de inicio 'i'. Por ejemplo, si G_{12} toma el valor 3, el carro 1 recorrerá tres arcos que parten del nodo 2 hacia otros nodos (Pascual,2019, Variables que intervienen en el problema, párr.7).

Restricciones

-Como se ha explicado en apartados anteriores, el problema que se estudia se representa como un grafo $D = \{V, A\}$. En éste, los nodos representan las localizaciones del almacén desde las cuales se pueden alcanzar una serie de productos almacenados o los cruces entre pasillos y los arcos la unión entre estas localizaciones, que estarán definidos como 0 o positivos según el layout del almacén. Lo que se quiere asegurar con esta restricción es que si un pedido está asignado a un carro (Z_{ot} activa) entonces cada nodo que contiene productos de ese pedido deberá ser visitado al menos una vez por el carro 't'. Esta relación se expresa matemáticamente de la siguiente manera (Pascual,2019, Restricciones, párr.3).

$$\sum_{(ij) \in i^+} (X_{tij} \geq z_{ot} \forall o \in O, t \in T, i: l(i) \in L_o)$$

4. Se ha definido anteriormente que para cada arco ij existe un arco ji , por tanto, aunque se alcance un nodo 'i' desde el nodo 'i-1' y se pretenda recorrer el camino inverso, es decir, regresar al nodo 'i-1', se recorrerán arcos diferentes. De este modo, un carro no recorrerá un mismo arco más de una vez. Para regularizar la continuidad de flujo en el grafo, se establece la siguiente restricción que asegura que cada carro que alcance un nodo i por alguno de sus arcos contenidos en i^- , debe abandonar el mismo por alguno de los arcos pertenecientes a i^+ . Esta relación se expresa matemáticamente de la siguiente manera (Pascual,2019, Restricciones, párr.4).

$$\sum_{(ij) \in i^+} X_{ij} = \sum_{(j,i) \in i^-} X_{ji} \forall i \in V, t \in T$$

Uno de los requisitos que deben cumplirse a la hora de la recogida de pedidos, es que los recolectores deben comenzar su ruta desde la posición origen, definida como {s} y 70 deberán terminar su ruta en la misma posición. Por tanto, esta restricción indica que, si un carro 't' recoge un determinado pedido 'o', es decir Z_{ot} se activa, se tiene que activar un

arco de salida del origen s para este carro. Esta relación se expresa matemáticamente de la siguiente manera (Pascual,2019, Restricciones, párr.5).

$$\sum_{(s,j) \in s^{+i}} X_{tsj} \geq z_{ot} \quad \forall t \in T, o \in O$$

Otra de las relaciones entre variables del problema que debe establecerse es que si un carro recorre un arco, por fuerza ese carro ha debido visitar el nodo conjunto de carros o recolectores disponibles del que parte. Es decir, si la variable $X_{t i j}$ se activa, deberá activarse también $Y_{t i}$ ya que implica que el carro ‘ t ’ visita el nodo ‘ i ’ y en caso contrario sería imposible que $X_{t i j}$ se activase. Esta relación se expresa matemáticamente de la siguiente manera (Pascual,2019, Restricciones, párr.7).

$$Y_{ti} \geq X_{tij} \quad \forall (i,j) \in A, t \in T$$

Función Objetivo

Esta busca minimizar las distancias totales recorridas asociadas a realizar la ruta correspondiente teniendo en cuenta los recorridos de las heurísticas S-shape y la Brecha más grande.

$$MIN \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n Dij * X_{ij} \quad i \neq j$$

Notación del modelo matemático

F.O

$$MIN \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n Dij * X_{ij} \quad i \neq j$$

s.a:

$$\sum_{(ij) \in i^{+i} \cup i^{-i}} (X_{tij} \geq z_{ot} \forall o \in O, t \in T, i: l(i) \in l_o) \quad (1)$$

$$\sum_{(ij) \in i^{+i} \cup i^{-i}} \quad (2)$$

$$\sum_{(s,j) \in s^{+i} \cup s^{-i}} X_{tsj} \geq z_{ot} \forall t \in T, o \in O \quad (3)$$

$$Y_{ti} \geq X_{tij} \forall (i,j) \in A, t \in T \quad (4)$$

7 Diseño seudocódigos heurísticas S-Shape y la brecha más grande

Algoritmo: la brecha más grande

input: una lista de selecciones

output: Secuencia de nodos a visitar

1. Recuperar todos los subpasillos con al menos 1 selección
2. Agrupe todo estos subpasillo (denote un subpasillo sa) con selecciones en bloque y clasifique los bloques en distancia decreciente desde el depósito para obtener B_s
3. Determinar el subpasillo más cercano (más a la izquierda o a la derecha) con selección en el bloque más alejado del depósito
4. Atraviese la ruta más corta P desde el depósito hasta el frente de este subpasillo y luego hasta la selección más alejada en el subpasillo
5. Elimine todas las selecciones de todos los bloques que se encuentran en esta ruta más corta para obtener los bloques resultantes $B_s^{(1)}$
6. Elimine todos los subpasillos $B_s^{(1)}$ en que ya no tengan selecciones para obtener los bloques resultantes $B_s^{(2)}$
7. # Divida cada subpasillo en $B_s^{(2)}$ en subpasillos delantero y trasero, luego combine todos los sa traseros no vacíos (respectivamente delanteros) para obtener $B_s^{(3)}$, una



```

        lista de medios bloques  $B_s^{(3)}$  []
    8. for  $b$  in  $B_s$  do
    9.      $Frente\_b \leftarrow []$ 
    10.     $Atrás\_b \leftarrow []$ 
    11.    for  $sa$  in  $b$  do
    12.         $d_1$  distancia total al recoger todas las selecciones desde el frente de  $sa$ 
    13.         $d_2$  distancia total al recoger todas las selecciones desde atrás de  $sa$ 
    14.        if  $length(sa) > 1$  then
    15.            Calcule la brecha entre todos los pares de nodos adyacentes en  $sa$ 
    16.             $d_3$  max (longitud de subpasillo – brecha entre 2 nodos adyacentes)
    17.        end if
    18.         $min_d = \min \{ d_1, d_2, d_3 \}$ 
    19.        if  $min_d = d_1$  then
    20.             $frente\_b \leftarrow frente\_b + sa$ 
    21.        else if  $min_d = d_2$  then
    22.             $atrás\_b \leftarrow atrás\_b + sa$ 
    23.        else
    24.             $frente\_b \leftarrow frente\_b + frente\_sa$ 
    25.             $atrás\_b \leftarrow atrás\_b + inversa(atrás\_sa)$ 
    26.        end if
    27.    end for
    28.     $B_s^{(3)} \leftarrow B_s^{(3)} + [atrás\_b, frente\_b]$ 
    29. end for
    nodo_secuencia  $\leftarrow P$ 
    
```

Algoritmo: S-Shape

input: una lista de selecciones

output: secuencia de nodos a visitar

1. Recuperar todos los subpasillos con al menos 1 selección
2. Agrupe todo estos subpasillo (denote un subpasillo sa) con selecciones en bloque y clasifique los bloques en distancia decreciente desde el depósito para obtener B_s
3. Determinar el subpasillo más cercano (más a la izquierda o a la derecha) con selección en el bloque más alejado del depósito
4. Atraviese la ruta más corta P desde el depósito hasta el frente de este subpasillo y luego hasta la selección más alejada en el subpasillo
5. Elimine todas las selecciones de todos los bloques que se encuentran en esta ruta más corta para obtener los bloques resultantes $B_s^{(1)}$
6. Elimine todos los subpasillos $B_s^{(1)}$ en que ya no tengan selecciones para obtener los bloques resultantes $B_s^{(2)}$
7. $nodo_secuencia \leftarrow P$
8. **for** b in $B_s^{(2)}$ **do**
9. Determine el sa más cercano (más a la izquierda o a la derecha) en el siguiente

```

10. bloque desde la posición actual
11. if closest sa is rightmost sa in next block then
12.     Invertir el orden de b
13. end if
14. # invertir el orden de los nodos en cada sa impar en cada bloque
15. for sa in b do
16.     if sa is even-numbered and not last subaisle then
17.         nodo_secuencia      nodo_secuencia + sa
18.     else if sa is even-numbered and last subaisle then
19.         nodo_secuencia      nodo_secuencia + camino a la última elección en sa
20.     else
21.         nodo_secuencia      nodo_secuencia + inversa(sa)
22.     end id
23. end for
24. end for
25. Atraviesa todos los nodos en nodo_secuencia
26. Regreso al deposito
    
```

8 Marco de Referencia

8.1 Marco de Antecedentes

Se presentan tres trabajos de grado que se realizaron en la escuela como tesis de pregrado de ingeniería industrial que sirven como referencia al modelo de enrutamiento para la recolección de pedidos que se pretende llevar a cabo en este proyecto.

Niño Gómez & Vargas Duarte (2018) desarrollaron un proyecto titulado “Algoritmo memético para el problema de localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo en el proceso de recolección de residuos sólidos en el centro de la ciudad de Bucaramanga de la empresa de aseo de Bucaramanga-EMAB” que tiene como finalidad abordar desde la perspectiva de la investigación de operaciones el proceso de recolección de residuos personalizados, el cual puede ser modelado con el objetivo de minimizar el costo operacional en el largo plazo, como un problema de localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (LRPTW). Con el algoritmo memético se pretenden establecer los puntos óptimos de transferencia de residuos y la ruta que debe seguir cada vehículo para cumplir con las

restricciones horarias, para evaluar el desempeño del algoritmo memético se utilizaron los problemas Gaspell, Min134 y el problema coord50-5-2BIS. Se tomaron como base estos problemas ya que son los más trabajados en la literatura y poseen características similares al problema a resolver en esta investigación, debido a que el LRPTW no tiene instancias establecidas para verificar su eficiencia.

Al año siguiente Camacho Uribe & Ramírez Corzo (2019) desarrollaron un proyecto que tiene como título “Un modelo multiobjetivo para el problema de ruteo de vehículos para la distribución de ayudas humanitarias para un cismo en la ciudad de Bucaramanga” en donde tienen como propósito comparar funciones objetivo de distancia y vulnerabilidad vial en un modelo multiobjetivo para el problema de ruteo de vehículos para la respectiva distribución de ayudas humanitarias tras la ocurrencia de un cismo, teniendo en cuenta que el modelo mencionado anteriormente minimiza la distancia recorrida y la vulnerabilidad de las rutas de viaje, utilizaron el lenguaje de programación Go en donde desarrollaron la búsqueda de las mejores soluciones al problema mediante un algoritmo evolutivo las cuales son generadas de las diferentes funciones objetivo que se evaluaron. Al realizar los análisis correspondientes encontraron una variación considerable en los resultados, lo que significa que hay una dispersión en los datos, lo cual afectara la evaluación del objetivo.

Dos años después Saenz Hoyos (2020) llevó a cabo un proyecto que tiene como título “desarrollo de un modelo matemático para el problema de ruteo e inventario con múltiples depósitos (MDIRP)”. Para este caso el autor desarrollo un modelo matemático para la solución del problema de ruteo e inventario con el fin de minimizar los costos de mantener inventario y los costos de transportar un producto, junto a la consideración de satisfacer la demanda de los clientes. Además, se analizaron diferentes metaheurísticas obtenidas en la revisión de literatura para escoger la que le va dar solución al modelo, y posteriormente uso Matlab para evaluar la eficiencia del algoritmo, finalmente se eligió la metaheurística

algoritmo genético para darle solución al problema ya que favoreció la aleatoriedad de las soluciones en la construcción de rutas iniciales las cuales ofrecieron una amplia exploración en las respuestas otorgadas por el modelo, en tiempos de ejecución relativamente cortos.

En este mismo año Rivera Jaimes & Jaramillo Piza (2020) llevaron a cabo un proyecto que se titula “Solución del problema de ruteo de vehículos capacitado (CVRP) usando el algoritmo de aprendizaje reforzado Q-Learning”. Para este proyecto los autores tienen como propósito disminuir los costos totales de transporte en los que se incurre al atender a un número de clientes, para dar solución al problema utilizaron un método con tiempos computacionales aceptables como el algoritmo Q-Learning y delimitaron el espacio de solución definiendo unas restricciones donde las variables son de tipo binarias. El algoritmo fue desarrollado en Python en donde se pueden encontrar las soluciones factibles y de esta manera cumplir con las variables del problema de ruteo de vehículos capacitado (CVRP).

Al siguiente año Merlano Canoles & Castellanos Pico (2021) desarrollaron un proyecto titulado “Un Algoritmo de Búsqueda Tabú para El Problema de Enrutamiento de un Recolector (SPRP) en un Almacén de Comercio Electrónico con Almacenamiento Disperso y Múltiples Depósitos”, donde busca diseñar un algoritmo de Búsqueda Tabú para el problema de enrutamiento de un recolector en un almacén de comercio electrónico con múltiples depósitos y almacenamiento disperso. Por consiguiente, se planteó un modelo matemático utilizando el método metaheurístico de búsqueda de tabú para la solución del problema de enrutamiento de un recolector (SPRP), a continuación, por medio del software Matlab se validó dicho algoritmo, para que arroje soluciones factibles y pertinentes.

Los trabajos mencionados anteriormente serán un gran aporte para la investigación, ya que contienen literatura concisa y pertinente para el trabajo que se está llevando a cabo y a su vez tienen varias características en común como la minimización de costos de operación,

rutas factibles con tiempos relativamente cortos de ejecución y en uno de los proyectos el software de programación. Después de la revisión de los cinco proyectos se puede deducir que la solución para el problema de ruteo es utilizada en diferentes enfoques y esto puede ser un gran punto de partida a la hora de dar solución a dicho problema, ya que en la actualidad es una clara problemática y al ser un tema tan flexible puede abarcar gran parte de las empresas colombianas.

9 Referencias Bibliográficas

- Arriola, R., y Ramos, F. (2019). *Framework basado en heurísticas que optimizan la ruta para recolectar productos en almacenes*. (Tesis de pregrado). Universidad autónoma de ciudad Juárez, Ciudad Juárez, México.
- Camacho, S., y Ramírez, G. (2020). *Un modelo multiobjetivo para el problema de ruteo de vehículos para la distribución de ayudas humanitarias para un cismo en la ciudad de Bucaramanga*. (Tesis de pregrado). Universidad industrial de Santander, Santander, Colombia.
- García, J. (2006). *Modelado mediante optimización combinatoria*. [Archivo pdf]. Personales upv. Recuperado el 16 de noviembre de 2021 de <http://personales.upv.es/jpgarcia/LinkedDocuments/MCOIOptimizacionCombinatoria.pdf>.

HEURISTICAS PARA PROBLEMAS DE ENRRUTAMIENTO

- Garza, G. (2018). *Metodología para optimización de proceso de preparación de pedidos en rutas de distribución secundaria mediante rediseño de almacén de vehículo de carga*. (Tesis de maestría). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, México.
- Hernández, B. (22 de diciembre de 2018). *Software vosviewer bibliométria*. Investiga y educa. Recuperado el 30 de septiembre de 2021 de <https://www.investigayeduca.com/software-vosviewer-bibliometria/#:~:text=El%20software%20VOSviewer%20versi%C3%B3n%201.6,citas%20o%20relaciones%20de%20autor%C3%ADas>.
- Hillier, F., y Lieberman G. (2017). *Introducción a la investigación de operaciones*. McGrawHill. https://dudasytareas.files.wordpress.com/2017/05/hillier_lieberman.pdf.
- Jiménez, V., Manotas, D. y Villota, R. (2013). *Configuración de pasillos en centros de distribución basada en modelos no tradicionales: modelo espina de pescado*. SciELO. Recuperado el día 10 de noviembre del 2021 de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-38032013000100014
- Juarez, J. (06 de septiembre de 2013). *Método heurístico*. Slideshare. Recuperado el 13 de noviembre de 2021 de <https://es.slideshare.net/profjavierjuarez/metodo-heurstico-1>.
- López, J. F. (19 de febrero de 2019). *logística de almacenamiento*. Economipedia.com. Recuperado el 13 de noviembre de 2021 de <https://economipedia.com/definiciones/logistica-de-almacenamiento.html>.
- Melian, B., Moreno, J. y Moreno, J. (2003). *Inteligencia artificial. Iberoamericana de inteligencia artificial*. <https://sci2s.ugr.es/sites/default/files/files/Teaching/GraduatesCourses/Metaheuristics/Bibliography/metaheuristics-vision-global.pdf>

- Masae M., Glock C. & Grosse E. (2020). Order picker routing in warehouses: A systematic literature review. *Revista internacional de economía de la producción*. Recuperado el 12 de noviembre de 2021, de la base de datos ScienceDirect
- Merlano, K., y Castellano K. (2021). *Un Algoritmo de Búsqueda Tabú para El Problema de Enrutamiento de un Recolector (SPRP) en un Almacén de Comercio Electrónico con Almacenamiento Disperso y Múltiples Depósitos*. (Tesis de pregrado). Universidad industrial de Santander, Santander, Colombia.
- Niño, A., y Vargas, J. (2018). *Algoritmo memético para el problema de localización y ruteo de vehículos con ventanas de tiempo en el proceso de recolección de residuos sólidos en el centro de la ciudad de Bucaramanga de la empresa de aseo de Bucaramanga-EMAB*. (Tesis de pregrado). Universidad industrial de Santander, Santander, Colombia.
- Ömer, Ö. & Deniz H., (2018). A discrete cross aisle desing model for order-picking warehouses. *Elsevier*. Recuperado el 13 de noviembre de 2021, de la base de datos ScienceDirect
- Platziteam. (01 de marzo de 2021). *Que es Python y por qué empezar a programar con este lenguaje*. Platzi. Recuperado el día 15 de noviembre del 2021 de https://platzi.com/blog/python/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=12915366154&utm_adgroup=&utm_content=&gclid=EAIaIQobChMI6L2E2KOb9AIVAAo-GCh1vpgseEAAYAiAAEgI_A_D_BwE&gclsrc=aw.ds.
- Rivera, P., y Jaramillo, O. (2020). *Solución del problema de ruteo de vehículos capacitado (CVRP) usando el algoritmo de aprendizaje reforzado Q-Learning*. (Tesis de pregrados). Universidad industrial de Santander, Santander, Colombia.

Sáenz, E. (2020). *Desarrollo de un modelo matemático para el problema de ruteo de inventario con múltiples depósitos (MDIRP)*. (Tesis de pregrado). Universidad industrial de Santander, Santander, Colombia.

Shetty, N., Sah, B. & Hoon, S. (2020). Route optimization for warehouse order picking operations via vehicle routing and simulation. *SpringerLink*. Recuperado el 10 de noviembre de 2021, de <https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2142/article/10.1007/s42452-020-2076-x>.

<https://www.mecalux.com.co/blog/metodo-abc-clasificacion-almacen> 11 noviembre 2020

