

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

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

Katia Lineth Merlano Canoles & Karina Lizzeth Castellanos Pico

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniería Industrial

Director

Carlos Eduardo Díaz Bohórquez

M.Sc. Ingeniería Industrial

Codirector

Fabián Alexander Torres Cárdenas

M.Sc. Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Bucaramanga

2021

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Dedicatoria

A Dios por permitirme llegar hasta donde he llegado.

A mis padres Leyla Mejía y Jaime Castellanos y hermanos Jaime Andrés, Jhovvana y Stella que me apoyaron durante toda mi carrera universitaria, supieron darme ánimos en los momentos que más los necesitaba, y por permitirme tener una educación superior de calidad.

A Harold Salcedo por su apoyo, amor y motivación incondicional en todos los momentos en los que presentaba dificultades.

A mis amigos Vanesa, Sergio y Paola por todos los momentos compartidos durante todo este camino de aprendizaje y momentos felices.

A mi amiga y compañera de tesis Katia Merlano, por la dedicación, esfuerzo y comprensión durante todo el desarrollo de la tesis de grado.

A nuestro director y codirector, Carlos Díaz y Fabián Torres por el conocimiento y ayuda que nos han brindado para la culminación del presente trabajo de grado.

A mis amigos de la universidad y de la vida, por su compañía.

Karina Lizzeth Castellanos Pico.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Primero a Dios, porque su presencia en mí vida me ha dado la fortaleza para lograr cada uno de los retos propuestos.

A Vera Canoles Petuz, quien me ha ofrecido el amor más puro e incondicional que una persona pueda tener. A ella, que siempre estuvo a mi lado para brindarme una palabra de aliento y quien, sin lugar a dudas, es la persona que me inspira a ser mejor cada día.

A mi padre y hermanos, por el apoyo y la confianza que han tenido en mí. Rober Merlano Mendez, Rober Merlano Canoles y Juan José Merlano, ustedes han sido pilares fundamentales en este logro.

A mis abuelos Francia Pertuz y Manuel Canoles, por enseñarme con amor, la importancia de la humildad y el respeto por las demás.

A mi compañera Karina Castellanos, por haber sido amiga y apoyo fundamental en la realización de este proyecto.

A nuestro director Carlos Diaz Bohorquez y al codirector Fabián Alexander Torres, por su guía, apoyo y paciencia.

A mis buenos profesores y compañeros en la Universidad Industrial de Santander.

A todas las personas maravillosas que conocí en esta etapa de mi vida, gracias brindarme tanto amor, por darme la mano cuando lo necesité y por contribuir a mi formación académica y profesional.

Katia Lineth Merlano Canoles.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Generalidades del Proyecto.....	17
1.1 Planteamiento del Problema	17
1.2 Justificación del Proyecto	19
2. Objetivos	21
2.1 Objetivo General.....	21
2.2 Objetivos Específicos.....	21
3. Revisión de la Literatura.....	22
3.1 Análisis Bibliométrico	22
3.1.1 Scopus.....	23
3.1.1.1 Indicadores Básicos.	24
3.1.1.1.1 Áreas de Investigación.....	24
3.1.1.1.2 Autores.....	24
3.1.1.1.3 Países.....	25
3.1.1.1.4 Documentos.	25
3.1.1.2 Indicadores de Relación.....	27
3.1.1.2.1 Palabras Clave.....	27
3.1.1.2.2 Citación Autores.	28
3.1.1.2.3 Acoplamiento Bibliográfico.....	29
3.1.1.2.4 Citación de Revistas.....	30
3.1.2 Web of Science	31

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

3.1.2.1 Indicadores Básicos	31
3.1.2.1.1 Áreas de Investigación.....	32
3.1.2.1.2 Autores.....	32
3.1.2.1.3 Países.....	33
3.1.2.1.4 Documentos.....	34
3.1.2.1.5 Indicadores de Relación.....	35
3.1.2.1.6 Palabras Clave.....	35
3.1.2.1.7 Citación autores.....	37
3.1.2.1.8 Acoplamiento Bibliográfico.....	37
3.1.2.1.9 Citación de Revistas.....	39
3.2 Análisis de la Literatura	40
3.2.1 Búsqueda de otras investigaciones en las que se haya abordado el problema de enrutamiento de un recolector (SPRP).....	49
4. Marco Teórico.....	56
4.1 Logística.....	56
4.2 Preparación de Pedidos o Picking.....	57
4.2.1 Almacenamiento Disperso	58
4.3 Investigación de Operaciones	58
4.3.1 Problemas de Optimización	60
4.3.2 Optimización Combinatoria.....	60
4.3.2.1 Complejidad Computacional	61
4.3.3 Algoritmos Exactos.....	62
4.3.4 Heurísticas.....	63

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

4.3.5 Metaheurísticas	65
4.3.5.1 Algoritmo Genético (GA).....	66
4.3.5.2 Optimización de Enjambre de Partículas (PSO).....	66
4.3.5.3 Optimización por Colonia de Hormigas (ACO).....	67
4.3.5.4 Recocido Simulado (SA).....	68
4.3.5.5 Búsqueda Tabú (TS).....	68
4.3.6 Herramienta computacional Matlab.....	70
4.3.6.1 Descripción del lenguaje de programación Matlab	71
5. Metodología	72
6. Descripción del problema y modelo matemático.....	74
6.1 Descripción del problema	75
6.2 Modelo Matemático	76
6.2.1 Formulación del problema	76
6.2.2 Descripción del Vecino más Cercano	79
6.2.3 Descripción de Búsqueda Tabú	79
6.2.3.1 Lista Tabú	80
6.2.3.2 Fundamentos	80
7. Diseño del algoritmo de Búsqueda Tabú	81
7.1 Matriz V	81
7.2 Matriz Distancia.....	83
7.3. Elementos de la matriz distancia cuando se encuentra en el mismo pasillo.....	83
7.4. Matriz Deposito	84
7.5. Rutas a Optimizar	85

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

7.6. Deposito Inicial.....	86
7.7. Ruta Inicial.....	86
7.8. Búsqueda Tabú.....	88
7.8.1 Representación de la Solución.....	89
7.8.2 Representación del Vecindario	90
8. Validación del algoritmo.....	92
8.1 Análisis de Varianza para Pequeñas Instancias.....	94
8.2 Análisis de Varianza para Medianas Instancias.....	97
8.3 Análisis de Varianza para Grandes Instancias	101
9. Resultados.....	105
9.1 Comparación de Búsqueda Tabú y Método Exacto.....	106
Conclusiones.....	115
Recomendaciones	117
Referencias Bibliográficas	118

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Lista de Tablas

	Pág
Tabla 1. Cumplimiento de objetivos del proyecto.	16
Tabla 2. Palabras clave con Scopus	28
Tabla 3. Citaciones por autor con Scopus.....	29
Tabla 4. Acoplamiento bibliográfico entre autores con Scopus	29
Tabla 5. Citación por revistas con Scopus	31
Tabla 6. Palabras clave con Web of Science.	36
Tabla 7. Citaciones por autor con Web of Science.	37
Tabla 8. Acoplamiento bibliográfico entre autores con Web of Science	38
Tabla 9. Citación por revistas con Web of Science.	40
Tabla 10. Ejemplo de la Matriz Ruta a optimizar (Matriz_Optimizar)	86
Tabla 11. Experimentos para el análisis factorial 2k en pequeñas instancias.....	93
Tabla 12. Experimentos para el análisis factorial 2k en medianas instancias.	94
Tabla 13. Experimentos para el análisis factorial 2k en grandes instancias.	94
Tabla 14. Análisis de Varianza	94
Tabla 15. Análisis de Varianza.	98
Tabla 16. Análisis de varianza para el diseño experimental.....	101
Tabla 17. Referencias tomadas para cada paquete de instancias	106
Tabla 18. Comparación de resultados entre métodos.	107
Tabla 19. Paquete de problemas instancia A.	109
Tabla 20. Paquete de problemas instancia B.	109
Tabla 21. Paquete de problemas instancia C.	110

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Tabla 22. Paquete de problemas instancia D.	111
Tabla 23. Paquete de problemas instancia E.....	111
Tabla 24. Paquete de problemas instancia F.....	112
Tabla 25. Paquete de problemas instancia G.	112
Tabla 26. Paquete de problemas instancia H, I, J, K	113
Tabla 27. Resultados de las instancias para distancia y tiempo de cómputo.....	114

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Número de artículos analizados.....	23
Figura 2. Áreas de Investigación en Scopus.	24
Figura 3. Autores más relevantes en Scopus.	25
Figura 4. Países líderes en investigación en Scopus.	26
Figura 5. Evolución del tema de investigación al largo de los años en Scopus.....	26
Figura 6. Mapa de palabras clave en Scopus.	28
Figura 7. Revistas más citadas entre los años 2010 y 2020 en Scopus.....	30
Figura 8. Áreas de investigación en Web of Science.....	32
Figura 9. Autores que más artículos han publicado en Web of Science.....	33
Figura 10. Países líderes en investigación en Web of Science.	34
Figura 11. Evolución del tema de investigación al largo de los años en Web of Science.....	34
Figura 12. Mapa de palabras clave en Web of Science.	35
Figura 13. Mapa de citación de autores en Web of Science.	36
Figura 14. Acoplamiento bibliográfico entre autores en Web of Science.	38
Figura 15. Línea de tiempo desde 2010 a 2020 en Web of Science.	39
Figura 16. Síntesis de la línea de tiempo: almacenamiento tradicional	44
Figura 17. Síntesis de la línea: almacenamiento disperso.....	49
Figura 18. Optimal order picker routing in a conventional warehouse with two blocks and arbitrary starting and ending points of a tour.....	55
Figura 19. Gestión de operaciones.....	59
Figura 20. Métodos de solución.....	60

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 21. Tipos de complejidad Computacional.	62
Figura 22. Routing order pickers in a warehouse with a middle aisle	64
Figura 23. Fases de la metodología.....	72
Figura 24. Pseudocódigo de la Matriz V	82
Figura 25. Ejemplo para la matriz Distancia	83
Figura 26. Matriz Distancia para diferente pasillo.....	84
Figura 27. Matriz Depósito.....	85
Figura 28. Pseudocódigo de la ruta inicial.....	87
Figura 29. Intercambio de nodos para el algoritmo metaheurística Tabú.....	88
Figura 30. Lista Tabú.....	89
Figura 31. Vector de posiciones de Almacenamiento.	90
Figura 32. Representación de la solución	91
Figura 33. Búsqueda Tabú.....	92
Figura 34. Gráfica de Pareto	95
Figura 35. Gráfica de efectos principales para tiempo de cómputo.....	96
Figura 36. Gráfico residuo vs orden	97
Figura 37. Gráfico de Pareto.....	99
Figura 38. Gráfico de efectos principales para tiempo de cómputo.	99
Figura 39. Gráfico residuo vs orden.	100
Figura 40. Gráfica de Pareto	102
Figura 41. Gráfico de efectos principales para tiempo de cómputo.	103
Figura 42. Gráfico residuo vs orden.	104

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Lista de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS

Apéndice A. Programa completo.

Apéndice B. Matriz distancia.

Apéndice C. Matriz depósito.

Apéndice D. Rutas a optimizar.

Apéndice E. Vector inicial.

Apéndice F. Vectores generados.

Apéndice G. Tabú función.

Apéndice H. Lista tabú.

Apéndice I. Matrices

Apéndice J. Programación gams

Apéndice K. Programación gams parámetros

Apéndice L. Artículo de carácter publicable.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

RESUMEN

Título: 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*

Autores: Katia Lineth Merlano Canoles**

Karina Lizzeth Castellanos Pico**

Palabras clave: Problema de Enrutamiento de un Recolector (SPRP), vecino más cercano, Búsqueda Tabú, comercio electrónico, logística.

Descripción:

En la presente investigación se trabaja el problema de enrutamiento de un recolector (SPRP) en un almacén de comercio electrónico, que presenta almacenamiento disperso, también conocido como estanterías mixtas, en donde las cargas unitarias se dividen en artículos individuales que se distribuyen por todo el almacén, el cual tiene múltiples depósitos. Este problema es considerado NP Hard, debido a 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.

Para solucionar este problema se diseñó un algoritmo basado en la metaheurística búsqueda tabú, donde se parte de una ruta inicial que se genera mediante la heurística vecino más cercano; adicionalmente se muestran los resultados obtenidos del método exacto elaborado con el software GAMS. Posteriormente se comparan los métodos de solución empleados en términos de tiempo computacional y distancia.

Se realizó un diseño experimental 2^2 con cinco replicas para determinar la influencia que tienen dos parámetros de entrada del algoritmo en la variable de respuesta distancia. Se da como resultado que el factor más representativo es el número de iteraciones, mientras que el número tabú resulta no tener significancia en dicha variable.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Programa de Ingeniería Industrial. Director M.Sc. Carlos Eduardo Díaz Bohórquez.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

ABSTRACT

Title: A Taboo Search Algorithm for a Single Picker Routing Problem (SPRP) in an E-Commerce Warehouse with Scattered Storage and Multiple Depots*

Autors: Katia Lineth Merlano Canoles**

Karina Lizzeth Castellanos Pico**

Keywords: Single Picker Routing Problem (SPRP), Nearest Neighbor, Taboo Search, e-commerce, logistics.

Description:

In this research we work on the single picker routing problem (SPRP) in an electronic commerce warehouse, which presents scattered storage, also known as mixed shelves, where unit loads are divided into individual items that are distributed throughout the warehouse, which has multiple depots. This problem is considered NP Hard, due to the variety of stored products located on a variable number of shelves and in different positions within them, thus causing multiple possible routes through which the selector can choose, as well as multiple deposit alternatives.

To solve this problem, an algorithm based on the taboo search metaheuristic was designed, where we start from an initial route that is generated by the nearest neighbor heuristic; additionally, the results obtained from the exact method elaborated with the GAMS software are shown. Subsequently, the solution methods used are compared in terms of computational time and distance. An experimental design 2^2 with five replicates to determine the influence that two input parameters of the algorithm have on the distance response variable. As a result, the most representative factor is the number of iterations, while the taboo number turns out to have no significance in that variable.

*Bachelor Thesis

**Faculty of Physicomechanical Engineering. Industrial and Business School. Industrial Engineering. Director M.Sc. Carlos Eduardo Díaz Bohórquez.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Introducción

La industria está atravesando un proceso de cambios vertiginosos por causa de los constantes avances en las tecnologías de la información y la comunicación, éstos han propiciado una nueva forma de interacción entre las personas y empresas conocida como comercio electrónico (Weidinger, 2018).

El comercio electrónico o E-commerce es un proceso de compra, venta, distribución, mercadeo y/o suministro de información de bienes o servicios a través de Internet, este comercio utiliza las variadas formas que existen de relacionarse entre empresas y consumidores, una de las más frecuentes es la de tipo empresa-consumidor (B2C) utilizada por los minoristas de comercio electrónico que atienden la demanda del cliente final; el desarrollo de E-commerce tipo B2C ha presentado nuevos desafíos para las empresas, uno de ellos es el proceso logístico de preparación de pedidos en los almacenes, ya que es complejo por sus ajustados tiempos de entrega y por la gran variedad de pedidos en pequeñas cantidades (Roxana Silva, 2009).

El almacenamiento disperso (también llamado estanterías mixtas) surge como una solución alternativa para este desafío logístico que afronta el E-commerce B2C, pues consiste en organizar los productos de forma aleatoria en diferentes estantes, de modo que el selector tenga la oportunidad de encontrar los artículos demandados en un menor tiempo debido a que aumenta la probabilidad de encontrarlos en distancias menores (Weidinger, Boysen y Schneider, 2019).

Teniendo en cuenta que el almacenamiento disperso supone una alternativa viable para optimizar los tiempos de preparación de pedidos para E-commerce B2C, en esta investigación se desarrollará el tema de enrutamiento de un recolector en almacenes de comercio electrónico con múltiples depósitos y almacenamiento disperso, éste es un problema de tipo NP-hard (Weidinger,

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

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 complejidad del problema enunciado anteriormente, se encuentra gran interés en ofrecer una alternativa de solución mediante un algoritmo de Búsqueda Tabú, dado que ha sido utilizado para este tipo de problemas en la literatura, por lo tanto, permite resolver el problema en tiempos computacionales razonables.

La presente propuesta se organiza de la siguiente forma: en el capítulo 3 se encuentra la revisión de literatura acerca del problema denominado SPRP y sobre la temática de picking en los almacenes de comercio electrónico. Luego en el capítulo 4 se presenta el marco teórico en el que también se encuentra el marco de antecedentes que permite conocer acerca de proyectos similares. Seguido del capítulo 5 donde se define la metodología que será utilizada en el desarrollo de la investigación. En el capítulo 6 se encuentra la formulación del modelo matemático, luego en el capítulo 7 se especifica la definición de parámetros a tener en cuenta para el modelo presentado. El diseño del algoritmo metaheurístico de Búsqueda Tabú para el problema tratado en la investigación se muestra en el capítulo 8, seguido de esto en el capítulo 9 se presenta la validación del mismo para luego presentar los resultados de esta en el capítulo 10. Finalmente, en el capítulo 11 y en el capítulo 12 se presentan las conclusiones del proyecto y las recomendaciones para futuras investigaciones.

Tabla 1

Cumplimiento de objetivos del proyecto.

Objetivo	Cumplimiento
-----------------	---------------------

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Realizar una revisión de literatura sobre el problema de enrutamiento de un recolector (SPRP) en un almacén de comercio electrónico con almacenamiento disperso y múltiples depósitos.	Capítulo 3
Definir el modelo matemático con los supuestos, variables y restricciones del problema propuesto.	Capítulo 6 y capítulo 7
Diseñar un algoritmo metaheurístico de Búsqueda Tabú y programarlo en el software Matlab, para el problema de enrutamiento de un recolector en un almacén de comercio electrónico con almacenamiento disperso y múltiples depósitos.	Capítulo 8
Validar el algoritmo de solución mediante instancias adaptadas de la literatura.	Capítulo 9 y capítulo 10
Elaborar un artículo de carácter publicable con los resultados del trabajo de investigación.	Apéndice L

1. Generalidades del Proyecto

1.1 Planteamiento del Problema

La preparación de pedidos es una actividad laboriosa dentro del proceso de almacenamiento en las empresas de minoristas de comercio electrónico; mediante la programación de operaciones a lo largo de los años, se han desarrollado diferentes modelos matemáticos los cuales han sido solucionados por diferentes métodos de solución (algoritmos exactos, heurísticas y metaheurísticas) con el fin de dar respuestas al problema en el que se busca la minimización de los tiempos y por lo tanto los costos en este proceso.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

El problema SPRP (problema de enrutamiento del selector único), consiste en determinar la mínima ruta en el proceso de picking, incluyendo las áreas de depósito a las que van los artículos seleccionados. Partiendo de esto, el SPRP consiste en dos subproblemas: 1) asignación del depósito y 2) la secuencia que tendrá la ruta del selector para el proceso de recolección de los productos. En la investigación se considera un almacén con estanterías mixtas, también conocido como almacenamiento disperso, el cual cuenta con múltiples depósitos para finalizar los pedidos y con un único recolector ubicado en un depósito arbitrario, el cual transporta por medio de un carro los artículos demandados. Se quiere lograr una solución que defina la ruta del recolector a través del almacén con un mínimo de 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 conjunto de depósitos en los que se pueden entregar los pedidos, en cada posición de secuencia se visita una posición de almacenamiento, se tienen como máximo C pedidos activos, de modo que no se exceda la capacidad de carrito dada, además el carro de picking puede procesar pedidos en paralelo y tiene una capacidad C . Solo se considera un único selector de pedidos, por tanto, no habrá selectores bloqueándose entre sí frente a los estantes, los depósitos o en los pasillos, además se asume que todos los artículos de una misma SKU son válidos para satisfacer un pedido, todos los contenedores tienen el mismo tamaño y finalmente el stock disponible en cada posición de almacenamiento se puede agotar, pero no puede volverse negativo.

El problema a tratar en esta investigación es el enrutamiento de un recolector en almacenes de comercio electrónico con múltiples depósitos y almacenamiento disperso, cabe destacar que

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

este tipo de problema es mucho más complejo que en los entornos tradicionales, debido a la variedad de posiciones de productos que se encuentran en los estantes y todas las posibles rutas por las que puede optar el selector. Adicional a que existen diferentes alternativas de depósito en las que el selector puede colocar el pedido para su posterior empaque; esta tarea es compleja para los tomadores de decisiones, siendo un problema de tipo NP hard, como lo definieron (Weidinger, Boysen y Schneider., 2019). Dada la dificultad en encontrar una solución a este tipo de problema, lo que se pretende es ofrecer un método de solución alternativo mediante la metaheurística Búsqueda Tabú, que permita obtener buenas soluciones en tiempos computacionales razonables.

1.2 Justificación del Proyecto

Siendo el internet el medio de comunicación más utilizado actualmente y partiendo de la necesidad de las empresas por facilitar a los clientes los procesos de compra, surge con gran fuerza la era del comercio electrónico; una alternativa que permite a los usuarios acceder, seleccionar y pagar los productos en cualquier momento y lugar del mundo. Llegando a tasas de crecimiento en Latinoamérica del 30% en los últimos cinco años y con una proyección entre el 40% y 50% para los próximos tres años. Así lo informó Marcos Pueyrredón, presidente del eCommerce Institute. Por su parte, según datos del mismo vocero, Colombia disputa con Argentina el segundo puesto del comercio electrónico en la región Latinoamericana («CRC Economía Digital», 2019). Al presente, uno de los retos más grandes que enfrenta el comercio electrónico, es la preparación de pedidos, que consiste en extraer y organizar los productos demandados por los clientes. Se conoce como la actividad más importante en los almacenes, ya que, representa hasta el 60% de todas las actividades laborales en el mismo y, para un almacén típico, el costo de la preparación de pedidos se estima en hasta el 55% del gasto operativo total del almacén (Tompkins et al., 2003). Una alternativa de solución por la que han optado muchas empresas, ha sido la

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

implementación de la estrategia de almacenamiento disperso (también conocido como estanterías mixtas) en donde las cargas unitarias se dividen en artículos individuales que se distribuyen por todo el almacén, lo que lleva a múltiples posiciones de almacenamiento por unidad de mantenimiento de existencia (Weidinger, 2018).

El problema a tratar en esta investigación es el enrutamiento de un recolector en almacenes de comercio electrónico con múltiples depósitos y almacenamiento disperso, cabe destacar que este tipo de problema es mucho más complejo que en los entornos tradicionales, debido a la variedad de posiciones de productos que se encuentran en los estantes y todas las posibles rutas por las que puede optar el selector. Adicional a que existen diferentes alternativas de depósito en las que el selector puede colocar el pedido para su posterior empaque; esta tarea es compleja para los tomadores de decisiones, siendo un problema de tipo NP hard, como lo definieron (Weidinger, Boysen y Schneider., 2019). Dada la dificultad en encontrar una solución a este tipo de problema, lo que se pretende es proponer un algoritmo metaheurístico de búsqueda tabú, que permita obtener buenas soluciones en tiempos computacionales razonables; debido a que es un enfoque estratégico para generar soluciones aproximadas a problemas de optimización combinatoria (Daniels et al, 1998), además, se considera dicho algoritmo ya que ha sido utilizado para la solución de este tipo de problemas.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

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.

2.2 Objetivos Específicos

1. Realizar una revisión de literatura sobre el problema de enrutamiento de un recolector (SPRP) en un almacén de comercio electrónico con almacenamiento disperso y múltiples depósitos.

2. Definir el modelo matemático con los supuestos, variables y restricciones del problema propuesto.

3. Diseñar un algoritmo metaheurístico de Búsqueda Tabú y programarlo en el software Matlab, para el problema de enrutamiento de un recolector en un almacén de comercio electrónico con almacenamiento disperso y múltiples depósitos.

4. Validar el algoritmo de solución mediante instancias adaptadas de la literatura.

5. Elaborar un artículo de carácter publicable con los resultados del trabajo de investigación.

3. Revisión de la Literatura

3.1 Análisis Bibliométrico

El crecimiento exponencial de la información y el conocimiento tiene estrecha relación con el surgimiento de nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones. De esta forma, la investigación científica y la propagación de las ideas en la sociedad constituyen un factor esencial en el desarrollo de nuevas formas de pensamiento y cómo esto transforma radicalmente el modo en que se ejecutan las actividades en todas las áreas del saber.

La gran cantidad de información científica que se ha generado en los últimos años y la facilidad con que se puede acceder a ella, ha creado un incentivo en la comunidad de investigadores a migrar hacia nuevas formas para su obtención, surgiendo de esta necesidad, la disciplina conocida como bibliometría; la cual hace uso de las matemáticas y estadística a un conjunto de publicaciones, teniendo en cuenta elementos como autores, tipo de documento, resumen, idioma, título de la publicación, palabras clave y contenidos. Dicho lo anterior, se puede tener una visión cercana a la enorme importancia que la bibliometría tiene en el campo de la investigación científica y como consecuencia han surgido herramientas tecnológicas que facilitan la extracción y el análisis de la información adquirida.

Para obtener una buena perspectiva de la investigación del enrutamiento de un recolector (SPRP) en un almacén de comercio electrónico con almacenamiento disperso y múltiples depósitos, se utilizaron dos de las principales bases de datos, Scopus y Web of Science, además se hizo un análisis tipo bola de nieve de citas en los artículos más relevantes de la investigación. Teniendo en cuenta que cada año se publica una gran cantidad de artículos, hay que recurrir al uso

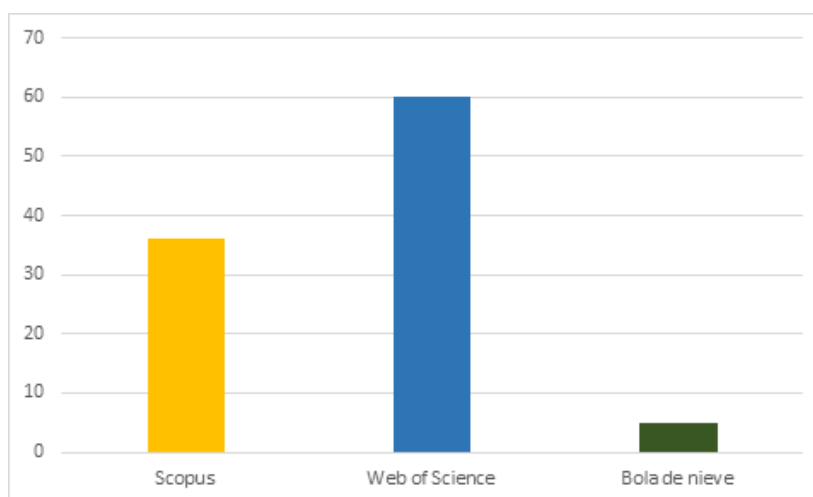
BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

del análisis bibliométrico, de modo que se pueda dar con documentos realmente significativos para la investigación.

Los indicadores básicos se tendrán en cuenta para mostrar las publicaciones por área de investigación (Figura 2), número de publicaciones (Figura 1), autores más relevantes y países que más publican, para los indicadores de relación se utilizará la herramienta VOSviewer, la cual sirve para la construcción de redes bibliométricas que permiten visualizar en mapas de redes las palabras clave, citación por autores, acoplamiento bibliográfico y citación de revistas.

Figura 1

Número de artículos analizados



A continuación, se mostrará la ecuación de búsqueda, los parámetros de exclusión y los análisis realizados en las bases de datos Web of Science y Scopus.

3.1.1 Scopus

Para Scopus la búsqueda incluyó las palabras clave “mixed shelves”, “picker”, “routing”, “tabu search”, “e commerce”, obteniendo 36 documentos al día 05/03/2020. Se utilizaron dos

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

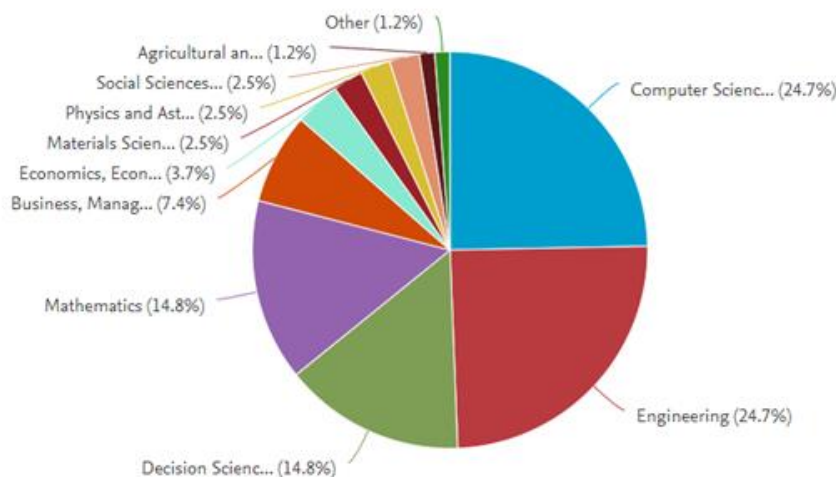
criterios de exclusión, el idioma inglés y las áreas del conocimiento relevantes para la investigación.

3.1.1.1 Indicadores Básicos. Al hacer el análisis de los resultados de la búsqueda, se obtuvieron las siguientes gráficas:

3.1.1.1.1 Áreas de Investigación. Las dos áreas de investigación más relevantes para la temática son ingeniería y ciencias de computación, teniendo relación con el 49,4% de los documentos publicados, seguidas de matemáticas y ciencia de decisiones con el 29,6 %. Como se puede observar estas cuatro áreas del conocimiento tiene el 70% de los documentos publicados en el tema de interés de esta investigación.

Figura 2

Áreas de Investigación en Scopus.



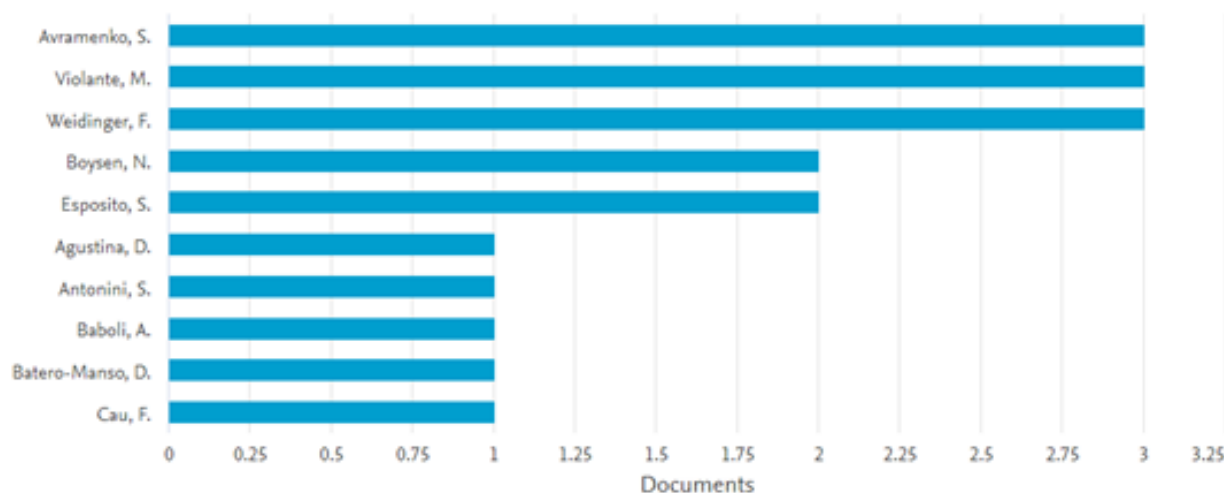
3.1.1.1.2 Autores. La Figura 3 muestra los 10 autores más relevantes para la investigación de acuerdo al número de documentos publicados, siendo los más importantes Avramenko, S.,

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Violante, M. y Weidinger, F., cada uno con tres documentos publicados, seguidos de Boysen, N. y Esposito, S. con dos documentos y los cinco finales con un documento cada uno.

Figura 3

Autores más relevantes en Scopus.



3.1.1.1.3 Países. En la Figura 4 se puede observar el liderazgo de Estados Unidos en la producción de artículos científicos relacionados con el tema de investigación, con un total de ocho documentos publicados, seguido de China e Italia con cinco documentos, por su parte Canadá y Alemania tienen cuatro publicaciones, las posiciones seis y siete, las ocupan Irán y Francia con tres y dos publicaciones respectivamente; llama la atención que Colombia se encuentra en la posición número diez con un paper publicado en 2018.

3.1.1.1.4 Documentos. La Figura 5 muestra la evolución que ha tenido el tema a lo largo de los años, se evidencia un aumento en el interés a partir de 2017 cuando fueron publicados siete documentos y a partir de esta fecha el número ha crecido, llama especialmente la atención que en

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

años recientes como 2010, 2011, 2012 y 2016 no se publicó ningún documento referente al tema de investigación.

Figura 4

Países líderes en investigación en Scopus.

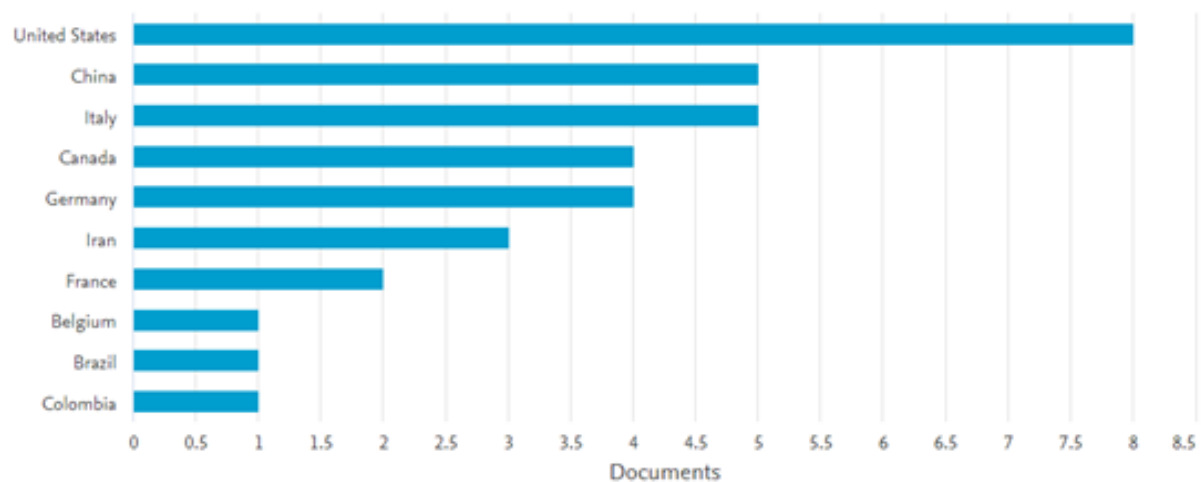
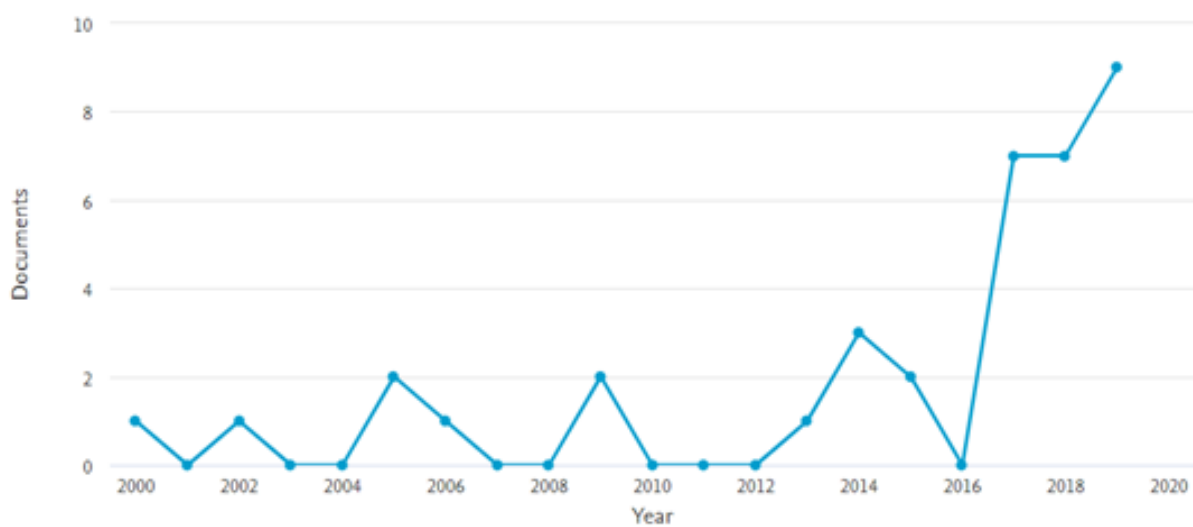


Figura 5

Evolución del tema de investigación al largo de los años en Scopus.



BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

3.1.1.2 Indicadores de Relación. Para la realización de los indicadores de relación se utilizó el software de VOSviewer, el cual se explicará detalladamente, a continuación:

Las herramientas que brinda el software VOSviewer son de gran utilidad en el momento de relacionar artículos que pertenecen a algún tema en específico, esto se debe a que acopla todas las referencias encontradas en la base de datos y por medio de una extracción de datos, se crean mapas bibliométricos, los cuales están basados en distancia para permitir determinar la fuerza de relación entre los elementos; una distancia menor indica que la relación es fuerte.

VOSVIEWER es un software libre que permite construir y visualizar redes bibliométricas, realiza también redes de co-ocurrencia, co-autoría, acoplamiento bibliométrico; a partir de técnicas de minería, mapeo y análisis de clusters. Además de contar con una interfaz amigable con el usuario facilitando la investigación y la escritura científica.

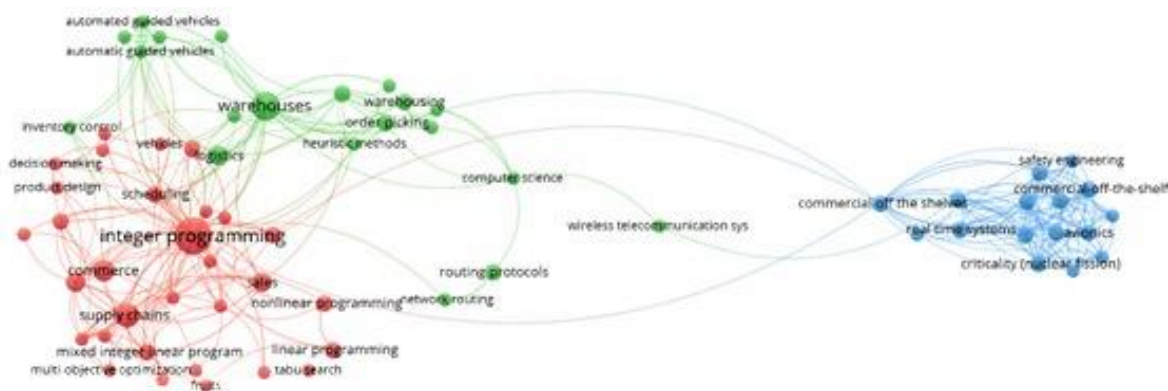
3.1.1.2.1 Palabras Clave. En la Figura 6 se observa el mapa de palabras clave distribuidas en tres conjuntos identificados por colores, donde los círculos de mayor tamaño representan la frecuencia de aparición de la palabra en los artículos.

En el conjunto rojo las palabras con mayor frecuencia de uso son integer programming, commerce y supply chains, en el conjunto verde son warehouses, order picking y logistics y en el conjunto azul se observa una frecuencia de aparición similar en la mayoría de los términos, algunas de las que se pueden destacar son commercial of the shelves y real time systems

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 6

Mapa de palabras clave en Scopus.



A continuación, se muestra en la Tabla 2 con los diez términos más importantes, ordenados según su ocurrencia.

Tabla 2

Palabras clave con Scopus

Palabras clave	Ocurrencia	Total link Strength
Integer programming	15	80
Warehouses	9	51
Supply chains	6	35
Commerce	5	17
Sales	4	29
Logistics	4	26
Costs	4	23
Comercial-off-the-shelf	3	35
Computer operating systems	3	35
Criticality	3	35

3.1.1.2 Citación Autores. Para mostrar los autores más importantes por sus citas a lo largo del tiempo, se mostrará una tabla (ver Tabla 3) que incluye el número de documentos

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

publicados por autor, citas y el total link strength que indica la fuerza total de coautoría de un investigador con otros investigadores.

Tabla 3

Citaciones por autor con Scopus

Autores	Documentos	Citaciones	Total link Strength
Tomasgard A	1	45	0
Zou B	1	35	0
Weidinger F	3	33	4
Boysen N	2	28	2
Tseng Y	1	28	0
De Koster R	1	22	1
Wu X	1	13	0
Xu M	1	13	0
Ukudu D	1	10	0
Schneider M	1	6	1

3.1.1.2.3 Acoplamiento Bibliográfico. Los enlaces de acoplamiento bibliográfico tienen en cuenta el número de publicaciones en que dos investigadores han sido coautores, esto permite visibilizar autores que han trabajado con otros que ya se tienen como referencia para ser tenidos en cuenta y analizar sus documentos para determinar si sirven de referencia para esta investigación.

Tabla 4

Acoplamiento bibliográfico entre autores con Scopus

Autores	Documentos	Citaciones	Total Link Strength
Weidinger F	3	33	414
Boysen N	2	28	384
De Koster R	1	22	327
Avramenko S	3	3	306
Violante M	3	3	306
Li Y	2	1	271
Chu C	1	0	253
Chu F	1	0	253
Coelho L	1	0	253
Coté J	1	0	253

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

La *Tabla 4* muestra los autores, documentos publicados, citas y el total link Strength, ordenada de acuerdo a la fuerza total de coautoría de un investigador con otros investigadores.

3.1.1.2.4 Citación de Revistas. La Figura 7

Revistas más citadas entre los años 2010 y 2020 en Scopus. presenta una línea de tiempo de las revistas más citadas en el periodo de tiempo comprendido entre los años 2010 y 2020. Según este, las revistas más importantes en los últimos años son European journal of operational, transportation research part b, transportation research part c y scientia iranica.

Figura 7

Revistas más citadas entre los años 2010 y 2020 en Scopus.



La *Tabla 5* muestra las revistas, documentos, citas y total link Strength, ordenada de acuerdo al número de citas de cada revista.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Tabla 5*Citación por revistas con Scopus*

Revista	Documentos	Citaciones	Total Link Strength
Transportation Research Part B: Methodological	1	35	0
European Journal Of Operational Research	2	28	2
Networks	2	15	0
Transportation Research Part C: Emerging Technologies	1	13	0
Journal Of Optimization Theory And Applications	1	12	0
Journal Of The Operational Research Society	1	10	0
Produce Degradation: Pathways And Prevention	1	10	0
Computers And Operations Research	1	5	2
Lecture Notes In Computer Science	1	2	0
Scientia Iranica	1	2	0

3.1.2 Web of Science

Para el análisis bibliométrico realizado en la base de datos Web of Science, el día 03/03/2020 se obtuvieron 60 artículos en idioma inglés, que fueron alcanzados con la ecuación de búsqueda: *mixed shelves and routing and e commerce or tabu search and warehouse*.

3.1.2.1 Indicadores Básicos. Al hacer el análisis de los resultados de la búsqueda, se obtuvieron las siguientes gráficas:

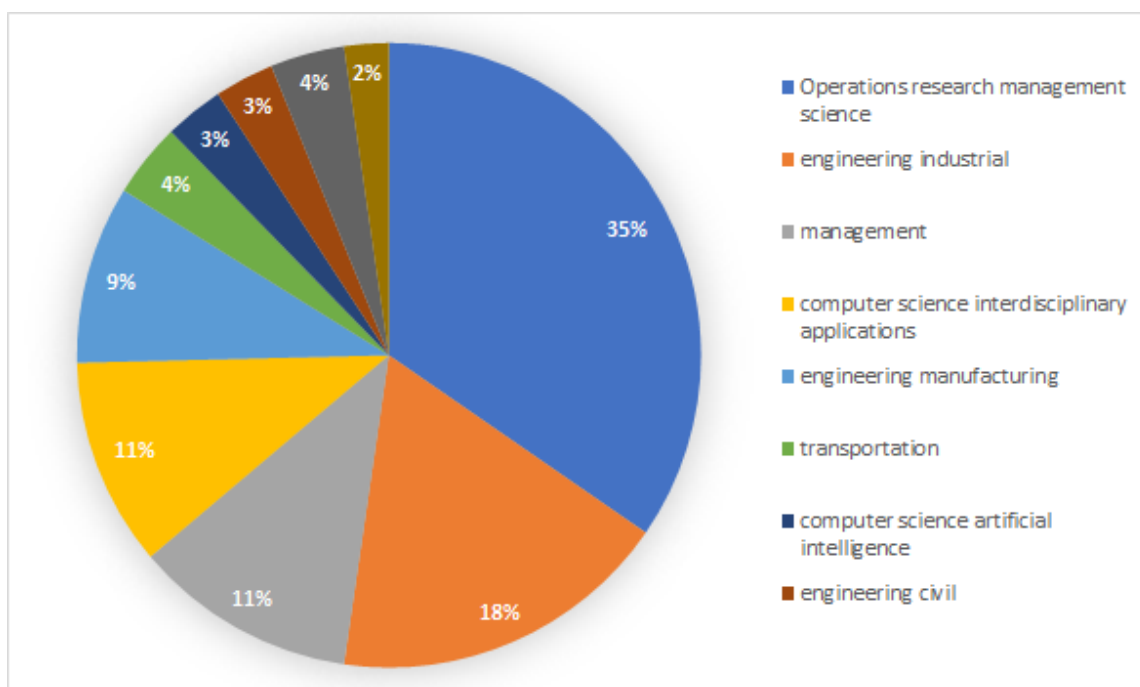
BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

3.1.2.1.1 Áreas de Investigación. Los resultados obtenidos se refinaron mediante las áreas de investigación, tales como, ciencia de la gestión de investigación de operaciones; ingeniería industrial; administración; aplicaciones informáticas interdisciplinarias; ingeniería de manufactura; transporte; inteligencia artificial en la informática; ingeniería civil.

En la Figura 8 se encuentra distribuido los porcentajes a los cuales corresponde cada una de estas áreas en la base de datos Web of Science.

Figura 8

Áreas de investigación en Web of Science.

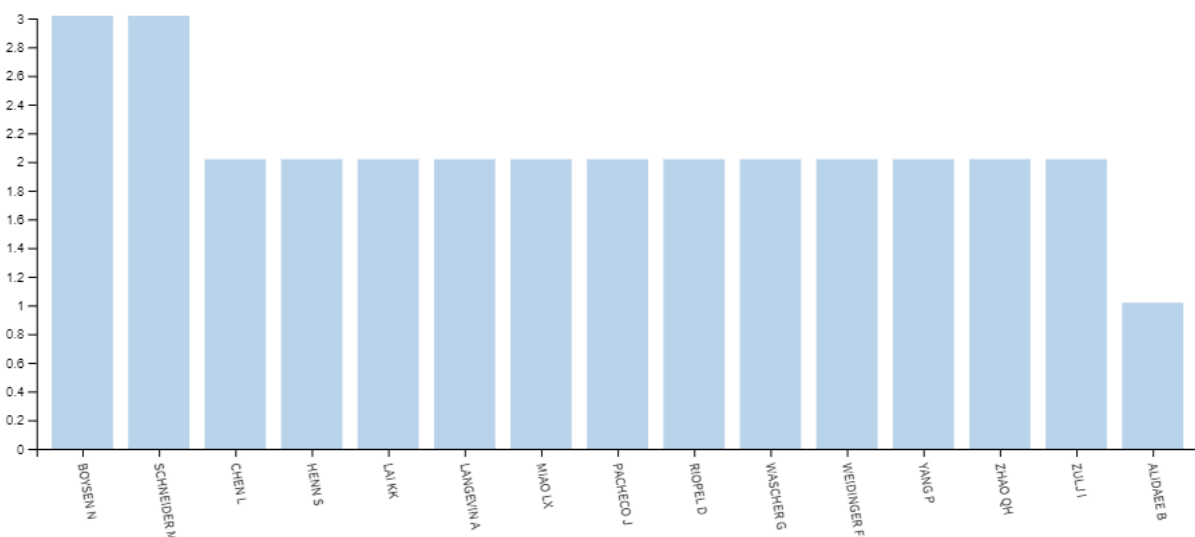


3.1.2.1.2 Autores. Teniendo en cuenta los análisis obtenidos de los resultados encontrados se encuentran los 15 autores que más artículos han publicado acerca del tema. En la **Figura 9** se observa que los autores que más publicaciones tienen son Boysen y Schneider, cada uno con tres artículos. Es de gran importancia tener presente que dichos autores, junto con Weidinger, publicaron el artículo (Picker routing in the mixed-shelves warehouses of e-commerce retailers,2019) el cual es considerado como la base de esta investigación.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 9

Autores que más artículos han publicado en Web of Science.



3.1.2.1.3 Países. Al analizar los autores más influyentes en el tema y determinar los relevantes, se da paso a conocer cuáles son los países en los que más se ha tratado el problema de investigación de enrutamiento del selector en almacenes de comercio electrónico con almacenamiento disperso; Según la gráfica obtenida mediante Web of Science, se visualiza que los países en los que más se investiga acerca del tema son, China, Estados Unidos de América, Alemania, Canadá, Turquía y Francia; todos estos países son desarrollados, por lo que se da a entender que el problema de investigación es bastante referido en el exterior y de gran importancia para potencias mundiales, tales como China y Estados Unidos, quienes son pioneros en estrategias de ventas por medio del comercio electrónico.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 10

Países líderes en investigación en Web of Science.

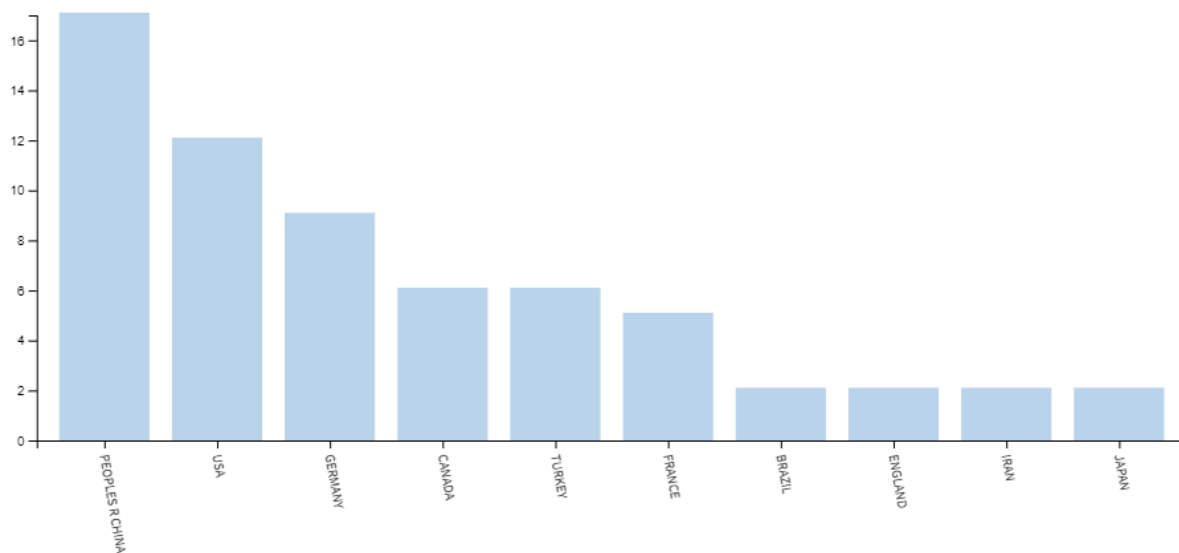
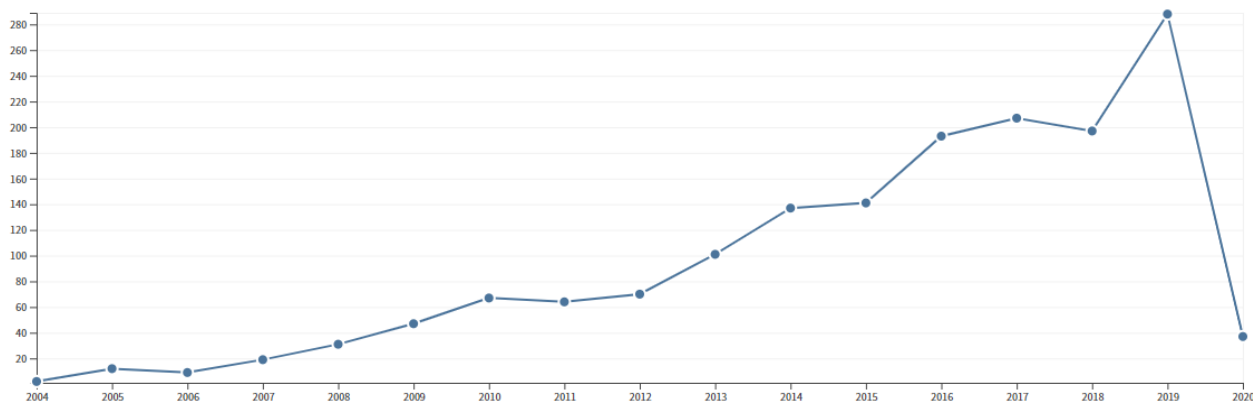


Figura 11

Evolución del tema de investigación al largo de los años en Web of Science.



3.1.2.1.4 Documentos. En la Figura 11 se evidencia la fuerza que ha tomado el tema a lo largo de los años, partiendo de los documentos citados en los últimos años desde 2004 hasta 2020, se puede percibir que el problema de investigación correspondiente al enrutamiento de un selector en almacenes de comercio electrónico con almacenamiento disperso, se ha incrementado

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

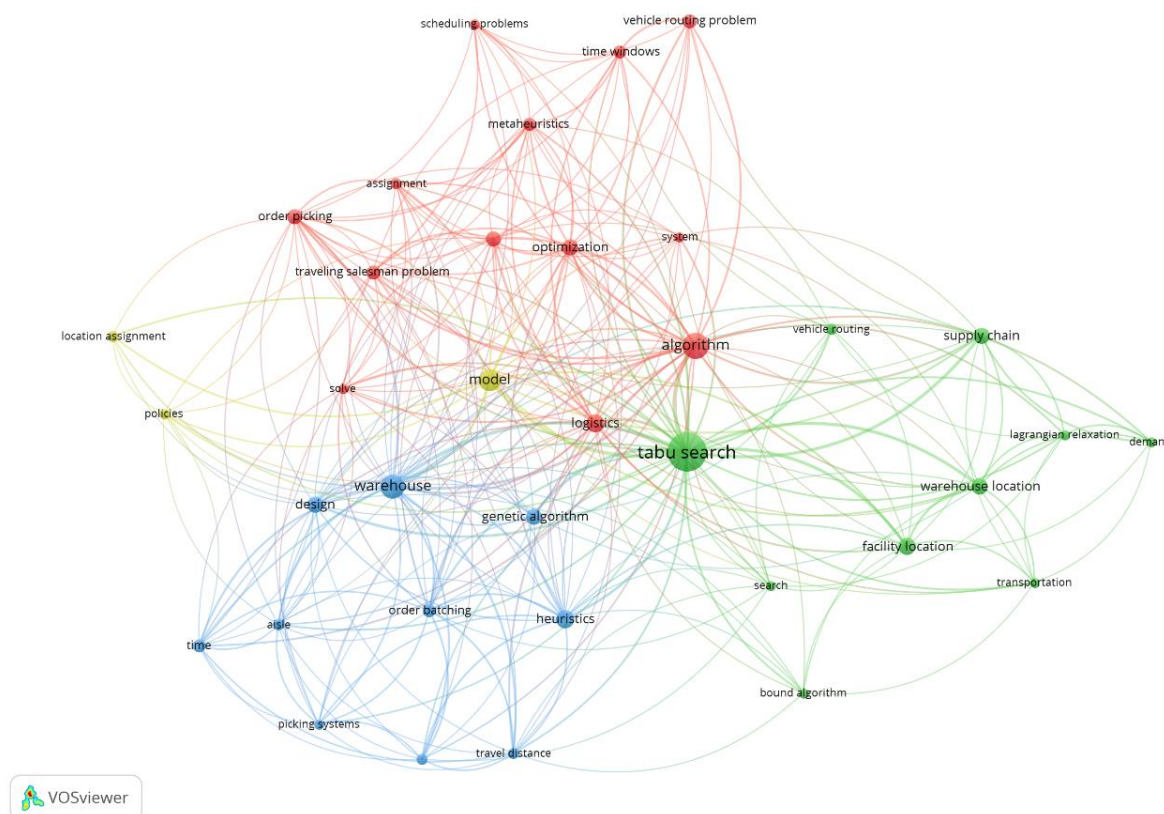
exponencialmente a lo largo del tiempo, observándose un aumento significativo del año 2015 al 2016, lo mismo ocurre entre los años 2018-2019.

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

3.1.2.1.6 Palabras Clave. Al elaborar el tesauro, con el fin de eliminar duplicidades en términos, se encontró que los resultados estaban limpios, obteniendo 35 palabras, distribuidas en cuatro clusters, los cuales representan algoritmos de agrupamiento por temáticas relevantes, en la Figura 12 se muestra el mapa obtenido mediante el software VOSviewer

Figura 12

Mapa de palabras clave en Web of Science.



La Tabla 6, a continuación, muestra las 10 palabras clave más significativas, clasificadas por el número de ocurrencia en los artículos; además tiene en cuenta el indicador total link strength

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

(fuerza de enlace total) el cual es considerado un atributo que indica el número de enlaces de un elemento con otros elementos, además de indicar la fuerza total del enlace entre los artículos.

Tabla 6

Palabras clave con Web of Science.

Palabras clave	Ocurrencia	Total link Strength
Tabu search	44	157
Algorithm	20	97
Warehouse	17	77
Model	15	54
Logistics	10	50
Heuristics	10	41
Optimization	8	37
Order batching	5	37
Order picking	7	36
Variable neighborhood search	7	33

Figura 13

Mapa de citación de autores en Web of Science.



BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

3.1.2.1.7 Citación autores. Mediante el software Vos Viewer, se obtiene el mapa de citación de autores, observado en la Tabla 7 donde se encuentran también en una línea de tiempo, el año en el que cada autor a publicado durante el periodo comprendido entre los años 2010 a 2020.

En la Tabla 7 se encuentran los 10 autores más representativos, ordenados según el número de veces que han sido citados. Cabe destacar que el autor más citado es Henn, Sebastian con un total de 91 citaciones; y también se presentan los autores más significativos de la presente investigación, como lo son Boysen y Weidinger con un total de 29 y 19 citaciones respectivamente.

Tabla 7

Citaciones por autor con Web of Science.

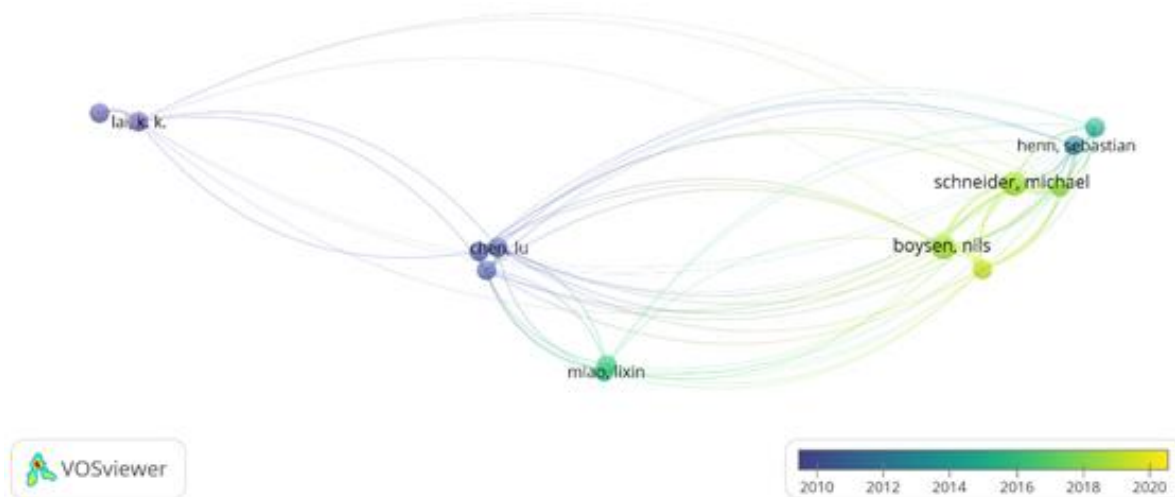
Autores	Documentos	Citaciones	Total Strength	Link
Henn, Sebastian	2	91	11	
Zao, Qiu-Hong	2	86	1	
Chen, Lu	2	54	8	
Langevin, Andre	2	54	8	
Riopel, Diane	2	54	8	
Waescher, Gerhard	2	51	7	
Lai, K.K	2	51	1	
Boysen, Nils	3	29	6	
Weidinger, Felix	2	19	6	
Miao, Lixin	2	18	6	

3.1.2.1.8 Acoplamiento Bibliográfico. La Figura 14 muestra la línea de tiempo comprendida entre el periodo 2010-2020, en el que se analizan los autores que se encuentran relacionados entre sí, junto con una aproximación del año en el que fueron publicados los documentos de dichos autores.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 14

Acoplamiento bibliográfico entre autores en Web of Science.



Partiendo de la información otorgada anteriormente, en la tabla 7, ordenada según el Total link Strength, conocido como fuerza de enlace total, el cual demuestra que tan vinculados se encuentran unos autores respecto a otros; se observa que los autores Schneider, Boysen y Weidinger ocupan los primeros puestos de la Tabla 8 puesto que dichos autores presentan varias referencias en común y también se citan entre ellos mismos en sus publicaciones.

Tabla 8

Acoplamiento bibliográfico entre autores con Web of Science

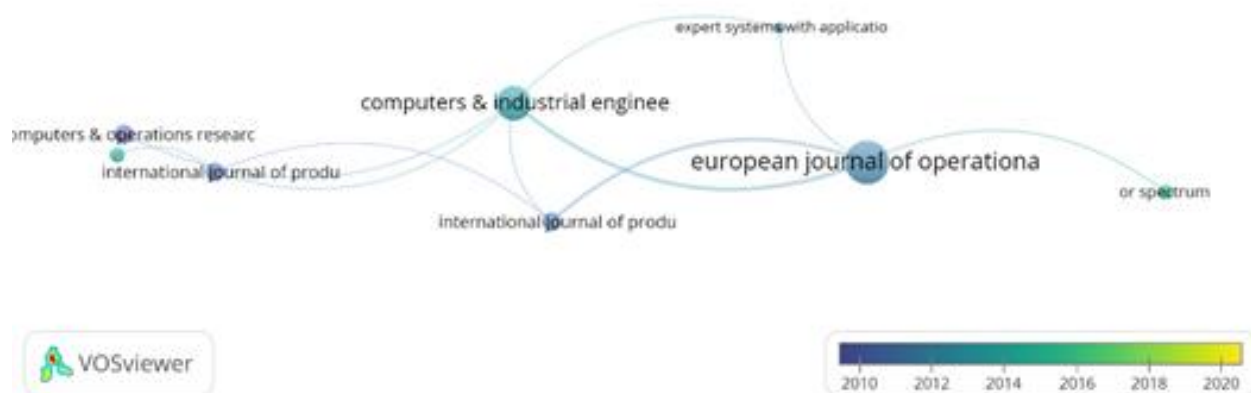
Autores	Documentos	Citaciones	Total Link Strength
Schneider, Michael	3	15	400
Boysen, Nils	3	29	398
Weidinger, Felix	2	19	360
Zulj, Ivan	2	12	313
Chen, Lu	2	54	231
Langrvin, Andre	2	54	231
Riopel, Diane	2	54	231
Henn, Sebastian	2	91	212
Waescher, Gerhard	2	51	136
Miao, Lixin	2	18	110

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

3.1.2.1.9 Citación de Revistas. En la **Figura 15** se muestra la línea de tiempo entre los años 2010 y 2020, en donde las revistas que han publicado acerca del tema más reciente son, European journal of operational research, Computers & industrial engineering.

Figura 15

Línea de tiempo desde 2010 a 2020 en Web of Science.



En la Tabla 9, se muestran las revistas organizadas de acuerdo al mayor número de citaciones que estas presentan, esto nos indica cuales son las que más son citadas de acuerdo al tema. Posicionándose European journal of operational research como la que más citaciones tiene con 537 y también la que más documentos tiene publicados con un total de 12. Seguida de Computers & industrial engineering, como se dijo anteriormente estas dos revistas son las más recientes en la línea de tiempo por lo que es considerada una buena opción para publicar acerca del tema en cuestión.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Tabla 9*Citación por revistas con Web of Science.*

Revista	Documentos	Citaciones	Total Link Strength
European Journal Of Operational Research	12	537	15
Computers & Industrial Engineering	9	240	11
Computers & Industrial Research	4	205	2
Expert Systems With Applications	2	106	2
International Journal Of Production Economics	4	74	7
Journal Of The Operational Research Society	2	68	0
Transportation Research Part E-Logistics And Transportation Review	2	66	0
International Journal Of Production Research	4	53	3
Networks	2	53	0
Or Spectrum	3	29	2

3.2 Análisis de la Literatura

Las empresas que se encuentran relacionadas con el comercio electrónico, presentan grandes ventajas tales como, la facilidad de promocionar sus productos mediante plataformas virtuales, ofrecer a los clientes diferentes medios en los que se pueden efectuar las compras, entre otras. Pero, por otro lado, se encuentran con actividades laboriosas, como lo es la preparación de pedidos dentro de los procesos de almacenamiento, ya que, esta actividad en este tipo de entorno requiere más tiempo y por lo tanto más trabajo. Algunos autores estimaron que representa hasta el 55% de los costos operativos totales del almacén y que se vuelve más complejo en almacenes de comercio electrónico debido a las grandes cantidades de pedidos (Tompkins, White, Bozer & Tanchoco, 2010).

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

A lo largo del tiempo, se han propuesto diferentes modelos matemáticos con los que se pretende ayudar a optimizar las operaciones de preparación de pedidos. Tres de los problemas que se tienen en cuenta en este tema son, la asignación de artículos a las diferentes ubicaciones de almacenamiento (Grose, Glock & Neumann, 2017), el procesamiento por lotes de pedidos y el enrutamiento del preparador de pedidos a través del almacén (Van Gils, Ramaekers, Caris & Koster, 2018). Para la solución de estos problemas se han propuesto tres métodos diferentes de solución.

1. Los algoritmos exactos, por medio de estos se llega a una solución óptima. Algunos ejemplos en donde se ha utilizado este método como solución son, De Koster y Van der Poort (1998), y Roodbergen y De Koster (2001a, b).

2. Las heurísticas, se definen como algoritmos dependientes de problemas creados con sus especificaciones (Sörensen, 2015). Algunos ejemplos son, heurística del punto medio, forma de S, retorno, combinada; se encuentran explicados en Roodbergen y De Koster (2001).

3. Las metaheurísticas, se definen como algoritmos independientes de problemas de alto nivel. Algunos ejemplos son optimización de colonias de hormigas, algoritmo genético, búsqueda Tabú en Daniels, Rummel & Schantz, (1998).

El problema del enrutador de pedidos en un almacén se relaciona al problema clásico del vendedor ambulante (TSP) así como lo exponen Ratliff y Rosenthal, 1983. En esta referencia, los autores abordan el problema en un almacén rectangular que contiene cruces solo en los extremos de los pasillos. Años más tarde, Kashi y Dirk, 1997; consideran una generalización del problema del vendedor ambulante (TSP) llamado problema del comprador viajero. Y como método de solución para resolver el problema en relación con la ubicación de la planta, los autores proponen un algoritmo de ramificación y acotamiento, también conocido como Branch and Bound. Mediante

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

esta investigación se llega a la conclusión que los problemas de tamaño de hasta 25 ciudades y 100 productos se puede resolver mediante el algoritmo, obteniendo resultados en un tiempo de cálculo razonable; también se demuestra que el problema del comprador viajero tiene aplicaciones en las áreas de programación, almacenamiento y enrutamiento (Kashi, Dirk,1997) siendo de gran importancia para futuras investigaciones.

Rubrico, Ota, Higashi y Tamura, 2008; Resuelven el problema de programación mediante la metaheurística búsqueda Tabú, se busca que la demanda sea transferida entre los agentes para equilibrar la carga y de esta forma sea más eficiente el proceso de picking dentro de la gestión del almacén. Posterior a esto, Henn y Wascher, 2012; tienen en cuenta los sistemas de preparación de pedidos manuales, en los que los selectores caminan a través del almacén para recoger los artículos solicitados por los clientes. Lo que pretende es combinar un conjunto de pedidos para luego agruparlos y de esta manera se minimice la duración total de todos los recorridos de recolección para los artículos solicitados. Convirtiéndose en un problema de procesamiento por lotes de pedidos, los autores lo resuelven mediante dos enfoques basados en el principio de búsqueda tabú. Se demuestra que los métodos propuestos proporcionan soluciones que permiten la eficiencia de la operación en los almacenes de distribución.

Tiempo después, Liu, Li y Liu, 2017; añaden al problema de enrutamiento de vehículos la variante de la capacidad y con tiempo de pedido disponible (CVRPOAT), se analiza dicho problema ya que se encuentra inmerso en las operaciones de la industria de comercio electrónico. Y se busca minimizar la suma de los tiempos de finalización del vehículo; al igual que los autores analizados anteriormente, se presenta un algoritmo de búsqueda tabú para abordar el tema y se compara con uno genético, los resultados indican que el algoritmo de búsqueda tabú es superior al algoritmo genético para tratar el problema mencionado. Otro aspecto importante a tener en cuenta

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

en la industria de comercio electrónico es la preparación de pedidos, proceso mediante el cual se recuperan artículos de sus ubicaciones de almacenamiento para satisfacer los pedidos de los clientes. Zulj, Glock, Grosse y Schneider, 2018; parten de la necesidad de generar un ahorro considerable de tiempo y costos en el proceso considerado como el más laborioso en el almacenamiento, y buscan una solución para un almacén en el que la asignación de almacenamiento está determinada por el peso de los artículos. Los autores desarrollan un método de solución exacto con el que buscan brindar estrategias para el proceso de asignación mencionado.

Para el problema de asignación de pedidos, el procesamiento por lotes de pedido y los problemas de enrutamiento de recolectores en los almacenes de recolección de olas, Ardjmand, Shaker i, Singh y Bajgiran, 2018; presentan un modelo matemático que se resuelve mediante un algoritmo exacto de descomposición lagrangiana combinado con un algoritmo de optimización de enjambre de partículas. En los problemas a gran escala se utiliza recocido simulado paralelo híbrido y optimización de colonias de hormigas. Los autores en su investigación, mediante experimentos numéricos muestran que el aumento de la cantidad de recolectores y la capacidad de recolección presenta un mayor impacto en la reducción de la producción improvisada cuando existe proporcionalidad entre los pedidos y la cantidad de recolectores.

En el año siguiente, se realiza una investigación teniendo en cuenta los avances tecnológicos en la robótica móvil, Lee, H.-Y., Murray y C.C, 2019; exploran un enfoque diferente al habitual para la preparación de pedidos de un almacén. En dicha investigación se consideran dos tipos de robots que realizan los procesos de recolección de artículos y de entrega a la estación de empaque. Los autores desarrollan una formulación de programación lineal entera mixta, mediante la cual llegan a las conclusiones, aumentar el número de pasillos transversales disminuye el rendimiento del sistema; las estaciones de empaque ubicadas en el centro mejoran el rendimiento

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

del sistema; y la distancia promedio desde cada ubicación de recolección hasta la estación de empaque y la distancia promedio entre ubicaciones de recolección son métricas efectivas para identificar cambios específicos en la flota (Lee, H.-Y., Murray, C.C.,2019).

En todas las investigaciones se ha determinado que el diseño del almacén es fundamental para la optimización de las operaciones de preparación de pedidos. Yener y Yazgan, 2019; investigan la efectividad del diseño de almacenes para determinar el tiempo promedio del proceso de preparación de pedidos y la distancia recorrida mediante una técnica de minería de datos. Partiendo de lo anterior, se examinan los problemas, la efectividad del diseño del almacén y el proceso de preparación de pedidos. En el mismo año, Boysen, Koster y Weidinger, 2019; presentan un ensayo en el que se exponen todos los tipos de sistemas de almacenamiento que han optado los minoristas de comercio electrónico, desde los tradicionales hasta la adaptación de las estanterías mixtas, también conocido como almacenamiento disperso.

Figura 16

Síntesis de la línea de tiempo: almacenamiento tradicional



BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Al abordar la temática de almacenamiento disperso, es necesario mencionar que han sido pocos los documentos publicados sobre el tema; según la revisión sistemática de la literatura publicada en Masae, Glock, & Grosse, (2019) en una muestra central de 54 documentos tan solo 4 han desarrollado el problema de enrutamiento en un sistema de almacenamiento disperso, lo cual permite evidenciar un campo de oportunidades para desarrollar algoritmos de enrutamiento para esta área.

En Singh & Oudheusden, (1997) por primera vez se estudia un almacén con almacenamiento disperso. En este artículo no se tuvo en cuenta el diseño particular del almacén, sino que se planteó el objetivo de encontrar un recorrido que minimizara la suma de los gastos de la ruta de viaje y la compra para un problema formulado TPP. El tema de almacenamiento disperso es introducido en el artículo cuando se proponen aplicaciones potenciales de la estructura del problema del agente viajero y se enuncia que para una situación en la que un artículo se almacena en un área de ubicación única del almacén, el problema ha sido reconocido como una variante del problema TPS, pero cuando un artículo se almacena en más de un área, el problema tiene la estructura de un TPP siendo ésta bastante compleja de resolver, por lo que para dar una solución se consideró un algoritmo de ramificación y acotamiento que funciona para cualquier tipo de matriz que considere las distancias de viaje de una ubicación de almacenamiento a otra; el caso del comprador viajero en el que se consideraba que uno de los problemas más grandes que afronta la recuperación de artículos en el área de almacenamiento es la selección de pedidos, los autores no consideraron un diseño de almacén en particular (Masae, Glock, & Grosse, 2019)

Con el seguimiento computacional de los inventarios, las piezas ahora se pueden almacenar en múltiples ubicaciones. En Daniels, Rummel , & Schantz , (1998) se estudia la preparación de pedidos para una secuencia en la que se visita una sola vez cada ubicación del

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

almacén donde las piezas se almacenan en múltiples ubicaciones, simplificando la reposición de inventario y eliminando la necesidad de reservar espacio para cada artículo. A diferencia de los modelos anteriores que solo requerían la cantidad de piezas solicitadas, se contempla el conjunto de ubicaciones en las que se almacena cada pieza y la cantidad de stock en cada una de ellas, siendo un problema combinatorio de asignación y secuenciación. Para su solución se muestra un procedimiento basado en la búsqueda tabú y una prueba de dureza NP para matrices de distancia. Finalmente hay que decir que esta investigación no intenta discutir sobre cuál sistema de almacenamiento es mejor, solo ofrecer una alternativa diferente al almacenamiento tradicional.

El auge de la venta de minoristas en línea de empresa a consumidor, ha hecho que surja la necesidad de adaptar las estrategias de almacenamiento a las necesidades particulares que se derivan de este mercado. Las nuevas estrategias deben hacer frente a múltiples desafíos tales como pedidos pequeños y tiempos de entrega críticos. Bajo esta circunstancia, emplear una estrategia de almacenamiento tradicional, con solo una o unas pocas posiciones de almacenamiento por SKU, daría como resultado largos recorridos de recolección. Por el contrario, una nueva estrategia emergente adaptada a las necesidades de los minoristas en línea, esta estrategia es conocida como almacenamiento disperso (Weidinger, 2018).

En Weidinger 2018, se investiga el problema de enrutamiento del recolector en un almacén de almacenamiento disperso rectangular, donde se pueden encontrar artículos del mismo SKU en diferentes posiciones de almacenamiento; lo que se busca es el recorrido más corto que permita satisfacer la demanda. El problema consiste en una selección y enrutamiento interrelacionados entre sí. Se proporciona una prueba de dureza NP y se presentan tres heurísticas de enrutamiento utilizando reglas de selección de ubicación de almacenamiento que calculan los valores de

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

prioridad para los artículos solicitados, que influyen en la secuencia de selección de los artículos solicitados en un pedido.

En Weidinger, Boysen, & Schneider, (2019) se extendió esto al caso en que los depósitos están ubicados en los extremos trasero y delantero de cada pasillo, de modo que los puntos de inicio y finalización de un recorrido de recolección pueden ser cualquiera de los extremos trasero y delantero de los pasillos de recolección (Masae, Glock, & Grosse, 2019).

Para solucionar el problema se adaptó el enfoque de vecino más cercano, un enfoque directo para encontrar una primera solución factible para MSPR, Posteriormente se desarrolló un procedimiento de solución basado en agrupaciones más complejo que extiende soluciones parciales de manera gradual para obtener valores de solución prometedores con pequeñas brechas de optimización. Se generaron muchas soluciones parciales en paralelo en cada paso y solo se agregaron las más prometedoras entre ellas a un conjunto central de soluciones. Esta investigación extiende el trabajo de Weidinger (2018) , en el que se aborda el enrutamiento del recolector con múltiples ubicaciones de almacenamiento por SKU en un almacén rectangular, pero, solo se asume un único depósito y un solo pedido de picking activo.

Cabe destacar que en este documento se resalta que el almacenamiento disperso es adecuado cuando se tienen pedidos de pequeño tamaño que requieren pocos artículos por línea de pedido, cuando se produce un pedido ocasional más grande con múltiples artículos, el stock en un solo estante puede no ser suficiente, y el recolector tiene que visitar múltiples posiciones de almacenamiento para reunir suficientes artículos. Por lo tanto, los pedidos de gran tamaño aumentan el esfuerzo de recolección bajo el almacenamiento de estanterías mixtas (Weidinger, Boysen, & Schneider, 2019).

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

En Yang, Chao, & Guo, (2020) se abordó la investigación desde la formulación de problemas de optimización de selección de lotes de pedidos para tres sistemas de almacenamiento típicos y se desarrolló un paquete de algoritmos.

La principal contribución de este documento es explorar exhaustivamente los problemas de optimización de preparación de lotes de pedidos mediante la formulación de modelos y desarrollos de algoritmos desde la perspectiva de diferentes escenarios de almacenamiento (Yang, Chao, & Guo, 2020).

Para resolver el problema del procesamiento por lotes de pedidos para los diferentes sistemas de almacenamiento se usaron cuatro tipos de algoritmos, los cuales se explican más a fondo a continuación:

- El algoritmo de distancia de intervalo de ubicación calcula la distancia entre ubicaciones de almacenamiento.
- El algoritmo de selección de ubicación elige la ubicación de selección de varias ubicaciones que almacenan la SKU idéntica.
- El algoritmo de enrutamiento decide la ruta de un recolector para visitar los lugares seleccionados en un viaje.
- El algoritmo de procesamiento por lotes de pedidos agrupa los pedidos en lotes.

En los resultados de esta investigación se evidencia que el rendimiento de las combinaciones de algoritmos propuestos es satisfactorio para resolver problemas con diferentes tamaños, tanto en calidad de la solución como en eficiencia del cálculo.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 17

Síntesis de la línea de tiempo: almacenamiento disperso.



3.2.1 Búsqueda de otras investigaciones en las que se haya abordado el problema de enrutamiento de un recolector (SPRP).

El problema de enrutamiento de un solo recolector trata con la determinación de la secuencia de acuerdo con las ubicaciones de los artículos que se deben visitar en un almacén de distribución y la identificación de las rutas correspondientes que deben recorrer los operadores humanos (recolector de pedidos) para recolectar conjunto de artículos solicitados por clientes internos o externos (Scholz, Henn, Stuhlmann, & Wäscher, 2016). El problema de enrutamiento de un solo selector (SPRP) representa un caso especial del clásico problema del vendedor ambulante (TSP) y, por lo tanto, también se puede modelar como un TSP (Scholz, Henn, Stuhlmann, & Wäscher, 2016).

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

En Ratliff y Rosenthal (1983) se define al problema de preparación de pedidos como uno de los más importantes a tener en cuenta en el proceso de almacenamiento, dicho problema se reconoce como una variante del conocido y complejo problema del vendedor ambulante. Los autores sugieren que, al encontrar un subgrafo T de recorrido de longitud mínima, se puede determinar de manera muy eficiente el recorrido para la preparación de pedidos, resolviéndose de esta forma el problema. De esta forma los autores presentan un algoritmo para resolver de manera óptima el problema. Los pasos que definieron fueron:

Paso 1. Comience el recorrido dejando que V_0 sea el primer vértice visitado.

Paso 2. Permita que V^* sea el vértice recientemente visitado.

Paso 3. Si hay un par de arcos paralelos no utilizados en T incidentes a V^* , use uno de estos para llegar al siguiente vértice. Vaya al paso 2.

Paso 4. Si hay arcos únicos no utilizados en T , use uno de estos para llegar al siguiente vértice. Vaya al paso 2.

Paso 5. Si hay un par de arcos paralelos en T con uno aun sin usar, úselo para llegar al siguiente vértice. Vaya al paso 2.

Paso 6. Pare, el recorrido de preparación de pedidos está completo.

En Daniels, Rummel , & Schantz (1998) se define que la preparación de pedidos en entornos de almacén convencionales implica determinar una secuencia en la que hay que visitar las ubicaciones únicas donde se almacena cada parte del pedido, y por lo tanto a menudo se modela como un problema de vendedor viajero. En esta investigación se formuló un modelo para determinar simultáneamente la asignación y las decisiones de secuencia, y se comparó con

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

modelos anteriores para la preparación de pedidos. Se discute la complejidad del problema de preparación de pedidos y se establece un límite superior en el número de asignaciones factibles, se presentan y prueban experimentalmente varias heurísticas para el TSP a la nueva configuración del problema y un algoritmo de búsqueda tabú.

En Scholz, Henn, Stuhlmann, & Wäscher (2016) tratan una aplicación del TSP que surge en la gestión del almacén de distribución en cuanto a su función principal, la preparación de pedidos. En este documento se presenta la primera formulación matemática para el SPRP que tiene en cuenta las propiedades específicas de las soluciones óptimas de este problema. En particular, se demuestra que el tamaño de la formulación es independiente del número de ubicaciones donde se deben elegir los artículos, mediante extensos experimentos numéricos se demuestra que la formulación propuesta para el SPRP es superior a las formulaciones estándar de TSP y Steiner TSP.

En este artículo, se considera el problema de enrutamiento de un solo selector en un diseño de bloque único que representa un caso especial del problema del vendedor ambulante. Se centra en el SPRP en diseños de bloque único, pero también se demostró cómo varias situaciones relevantes como el diseño de bloques múltiples, depósito descentralizado se integran a la formulación propuesta (Scholz, Henn, Stuhlmann, & Wäscher, 2016).

El problema estándar de enrutamiento de un solo recolector (SPRP) busca el recorrido de costo mínimo para recolectar un conjunto de artículos dados en un almacén rectangular de un solo bloque con pasillos de picking paralelos y una política de almacenamiento dedicada, es decir, cada SKU solo está disponible desde una ubicación de almacenamiento en el almacén (Schneider & Goeke, 2018).

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

En Schneider & Goeke (2018) se presenta una formulación compacta que renuncia a las restricciones clásicas de eliminación de subtour explotando directamente dos de las propiedades de un recorrido de picking óptimo utilizado en el algoritmo de programación dinámica de Ratliff y Rosenthal (1983) y se extiende la formulación de tres entornos importantes que prevalecen en los modernos almacenes de comercio electrónico: almacenamiento disperso, desacoplamiento del recogedor y el carro, y múltiples depósitos finales. En estudios numéricos, esta formulación supera a formulaciones SPRP estándar existentes de la literatura y demuestra ser capaz de resolver grandes instancias en poco tiempo de ejecuciónas instancias de tamaño realista de las tres extensiones de problemas también se pueden resolver con un bajo esfuerzo computacional. Se encuentra que el desacoplamiento del recogedor y el carro puede conducir a ahorros sustanciales de costos dependiendo de la velocidad y la capacidad del recolector cuando viaja solo, mientras que los depósitos finales adicionales son bastante limitados beneficios en un almacén de un solo bloque (Schneider & Goeke, 2018).

En Weidinger (2018) se investiga el problema de enrutamiento del selector en un almacén con un sistema de almacenamiento disperso rectangular, se identifica como un problema combinado de selección y enrutamiento. En esta investigación se opta por analizar este tipo de almacenamiento ya que es considerada una nueva estrategia emergente adaptada a las necesidades de los minoristas en línea. Weidinger elabora un modelo con el objetivo de minimizar la distancia total del recorrido de recolección que se calcula mediante la suma de las distancias C_{ij} entre todas las posiciones de almacenamiento visitadas consecutivamente.

Mediante la configuración de los parámetros se obtiene un almacén entre 5000 y 8000 metros cuadrados, y para dar solución al problema propone tres enfoques con el fin de calcular los

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

valores de prioridad P para una determinada posición, dichos enfoques son, Single position, MinMax y MinMin.

En la investigación de Weidinger se tiene como objetivo encontrar el recorrido de selección más corto, el problema se conforma en dos partes, una primera de selección, en la que se seleccionan los productos que serán recogidos otra de enrutamiento en la cual se trazará la ruta que debe recorrer el recolector. Las heurísticas que se presentan están basadas en el trabajo de Ratliff y Rosenthal (1983) expuesto anteriormente, y se determina que la heurística que se presentó, menos compleja que el algoritmo de Búsqueda Tabú en Daniels et al (1998), resuelve instancias de tamaño real en tiempos computacionales razonables.

En Weidinger, Boysen, & Schneider (2019) se considera un almacén de estanterías mixtas que consta de un conjunto P de posiciones de almacenamiento, cada una almacenando inicialmente $\gamma_p \geq 0$ artículos de una SKU $s \in S$, donde S denota el conjunto total de SKU. Además, se tiene un conjunto D de depósitos (también indicado como puntos de acceso), donde las órdenes de recolección completadas se entregan al sistema transportador, y se recuperan contenedores vacíos para nuevas órdenes.

Los autores aplican una construcción de una heurística con la cual se extiende soluciones parciales de forma gradual, con el fin de obtener valores de solución asertivos se generan muchas soluciones parciales en paralelo y solo tienen presentes las más prometedoras dentro de un conjunto central de soluciones. También se aplica el algoritmo de Ratliff y Rosenthal (1983) explicado previamente, como un subprocedimiento para determinar el recorrido óptimo del recolector circular en un almacén rectangular en donde se busca realizar el proceso de recolección de pedidos pasando por las diferentes posiciones de almacenamiento.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Se considera un único selector de pedidos, cuyo carrito de selección puede transportar hasta C contenedores simultáneamente para recoger pedidos de selección e inicialmente, el selector está ubicado en un depósito arbitrario. El enrutamiento del selector es mucho más complejo que en los entornos tradicionales: cada selector ensambla simultáneamente varios pedidos, hay muchos depósitos alternativos disponibles y los artículos del mismo SKU están disponibles en múltiples estantes (Weidinger, Boysen , & Schneider, 2019).

Para resolver el problema se formula un programa de enteros mixtos que permite resolverlo con un solucionador estándar Gurobi. Luego, se presentan procedimientos de solución heurística mediante una adaptación al enfoque del vecino más cercano y un procedimiento basado en agrupaciones y dos últimas heurísticas ejecutadas con el procedimiento de mejora adicional mediante búsqueda local (NN+, piscina+).

En Masae, Glock y Vichitkunakorn (2020) se investiga acerca del proceso de preparación manual de pedidos, el cual se caracteriza por los trabajadores que deben viajar a través del almacén para realizar el proceso de picking. Los autores de la investigación buscan minimizar el tiempo de finalización de los pedidos y para esto desarrollaron la heurística en forma de S y la compararon con un método exacto, para lograr el propósito de enrutamiento en el que se guía al selector a través del almacén. Mediante esto proponen una política de enrutamiento para un almacén convencional conformado por dos bloques y puntos de inicio y finalización arbitrarios para los recorridos.

En esta investigación se considera un almacén convencional con dos bloques, superior e inferior, donde cada bloque tiene r pasillos paralelos con igual longitud y ancho, se encuentran tres pasillos transversales; se tiene en cuenta que los puntos de inicio y finalización del recorrido de preparación de pedidos deseado puede ser cualquier ubicación en el almacén. Se extiende el trabajo

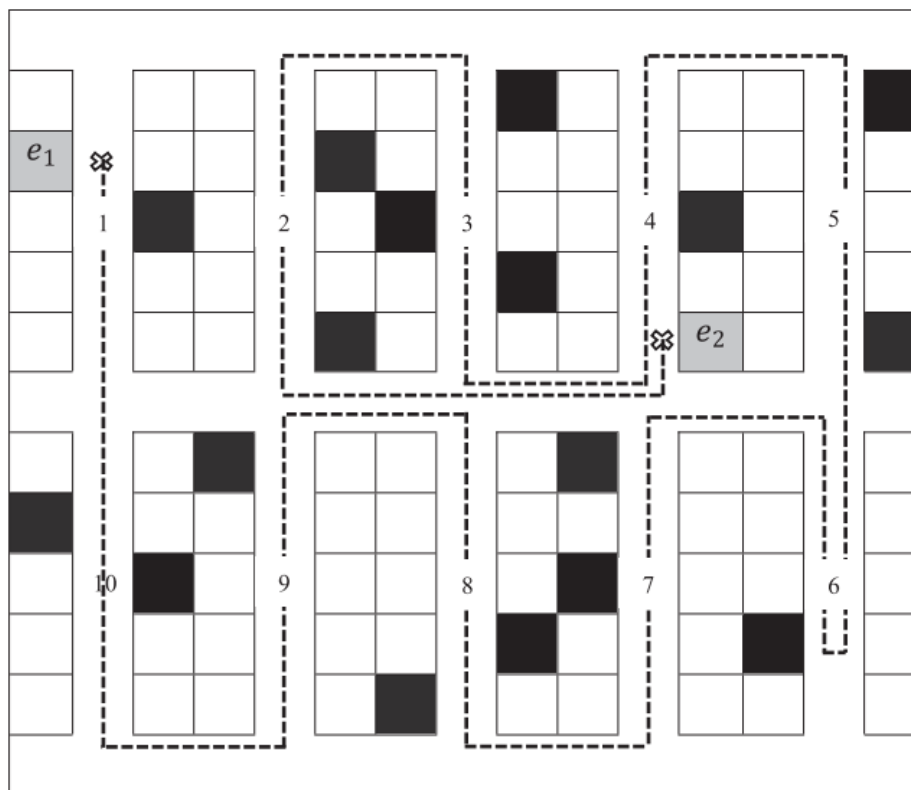
BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

al tener dos bloques y se soluciona mediante procedimientos propuestos en los trabajos de Ratliff y Rosenthal (1983) y Roodbergen y de Koster (2001a).

Los autores proponen una heurística de enrutamiento en forma de S, enumeran los dos pasillos secundarios de selección de 1 a $2r$, comienzan enumerando en el bloque superior, los pasillos secundarios de izquierda a derecha, luego en el bloque inferior de derecha a izquierda. El recorrido se muestra en la Figura 18, donde los bloques negros representan las posiciones en donde se encuentran los artículos a recoger y los bloques con las letras e_1 y e_2 representan los puntos de inicio y finalización del recorrido respectivamente.

Figura 18

Optimal order picker routing in a conventional warehouse with two blocks and arbitrary starting and ending points of a tour. Recuperado de Masae, Glock y Vichitkunakorn. International Journal of Production Research.



BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante el algoritmo exacto y la heurística en forma de S, establecen que el algoritmo exacto obtuvo recorridos que fueron entre 6.32% y 35.34% más cortos que los generados por la heurística.

4. Marco Teórico

El presente trabajo analiza el problema de enrutamiento de un recolector (SPRP) en un almacén de comercio electrónico con almacenamiento disperso y múltiples depósitos, solucionándolo mediante la metaheurística tabú. Por tal razón, es importante definir algunos conceptos, para delimitar la interpretación que tendrán estos términos en el proyecto.

4.1 Logística

La logística es un componente de la cadena de suministro que consiste en la planificación, ejecución y control de los productos entregados a los clientes. El manejo logístico puede involucrar actividades de almacenamiento, transporte que entra y sale, gestión de flotas, manipulación de materiales, manejo de inventarios y planeación de la demanda.

La logística del almacenamiento cubre las actividades relacionadas con guardar, proteger y conservar adecuadamente la mercancía; además se encarga de su gestión, el transporte, ubicación, manipulación y acondicionamiento, desde que se recibe hasta que se despacha. Las áreas de trabajo de la logística de almacenamiento son la recepción, el almacenaje, la preparación de pedidos y expedición de mercancías. Estos almacenes usan elementos que ayudan a monitorear el inventario y guardarlo de manera idónea. Dichos elementos son:

- Sistemas de estanterías y estantes que permitan fácil acceso a los productos y gran capacidad de almacenamiento.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

- Equipo de personas encargadas de la realización de las actividades.
- Software de control de inventarios que permite ubicar las unidades en el sistema en cualquier momento.
- Sistema de climatización.
- Equipos tales como montacargas, contenedores, cintas transportadoras, entre otros.
- Seguridad para elementos almacenados y personal.

4.2 Preparación de Pedidos o Picking

La preparación de pedidos a menudo se ha descrito como uno de los procesos de logística interna más laboriosos. Abarca todas las operaciones necesarias para recoger un producto dentro del almacén y situarlo en la zona de depósito de forma eficiente. Los elementos fundamentales de la preparación de pedidos son el sistema de gestión de almacenes, recogida en la zona de almacenaje (estanterías) y consolidación en zona de depósito.

El proceso de preparación de pedidos en almacenes de comercio electrónico resulta bastante desafiante. Por esto, Para mejorar la eficiencia operativa de los almacenes de comercio electrónico, se han desarrollado y aplicado en la práctica sistemas de almacenamiento en varias ubicaciones, lo que significa que cada unidad de almacenamiento puede almacenarse en múltiples ubicaciones o una ubicación puede contener múltiples unidades de almacenamiento. Cuando los pedidos se recogen en un lote, la forma de seleccionar la ubicación de recolección de las ubicaciones de almacenamiento que tienen la misma unidad de mantenimiento de existencias obviamente afecta la distancia que deben recorrer los recolectores para completar las tareas de recolección (Yang, Zhao, & Huijie, 2020)

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

4.2.1 Almacenamiento Disperso

Las cargas de unidades entrantes se aíslan en unidades individuales, que se distribuyen aleatoriamente por todos los estantes del almacén. En tal entorno, la probabilidad de que un recolector siempre se encuentre cerca de una unidad de mantenimiento de existencias (SKU) demandada es alta, independientemente de su posición actual en el almacén (Weidinger, Boysen, & Schneider, 2019).

En un almacén con almacenamiento disperso, el enrutamiento del selector es mucho más complejo que en los entornos tradicionales: cada selector ensambla simultáneamente varios pedidos, hay muchos depósitos alternativos disponibles y los artículos del mismo SKU están disponibles en múltiples estantes (Weidinger, Boysen, & Schneider, 2019).

Para dar respuesta a los problemas de optimización en el almacenamiento de las empresas se recurre al área científica de la investigación de operaciones, ya que por medio de esta se puede llegar a soluciones factibles u óptimas que se pueden aplicar en la realidad.

4.3 Investigación de Operaciones

La investigación de operaciones o también conocida como investigación operativa, es una disciplina que consiste en la aplicación de métodos analíticos avanzados con el fin de proporcionar apoyo en el proceso de toma de decisiones en las empresas; utiliza técnicas de modelamiento matemático, optimización, análisis estadístico, con el fin de alcanzar soluciones óptimas a problemas presentados.

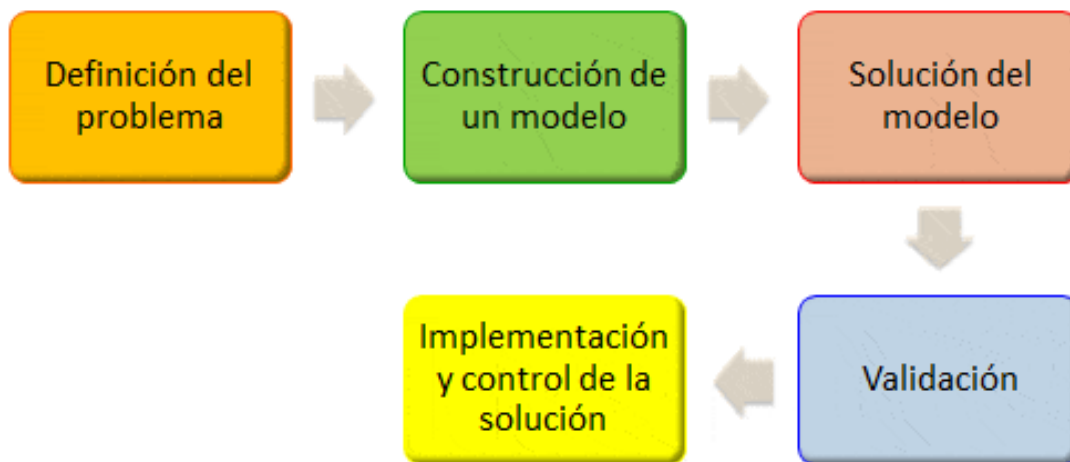
Un modelo matemático es una herramienta analítica útil para lograr una visión estructurada de la realidad mediante fórmulas matemáticas, expresan variables, entidades, parámetros. Lo que se busca es analizar el comportamiento de los componentes en el sistema con el objetivo de

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

optimizar su desempeño. Las fases de la construcción de un modelo de optimización se encuentran en la Figura 19.

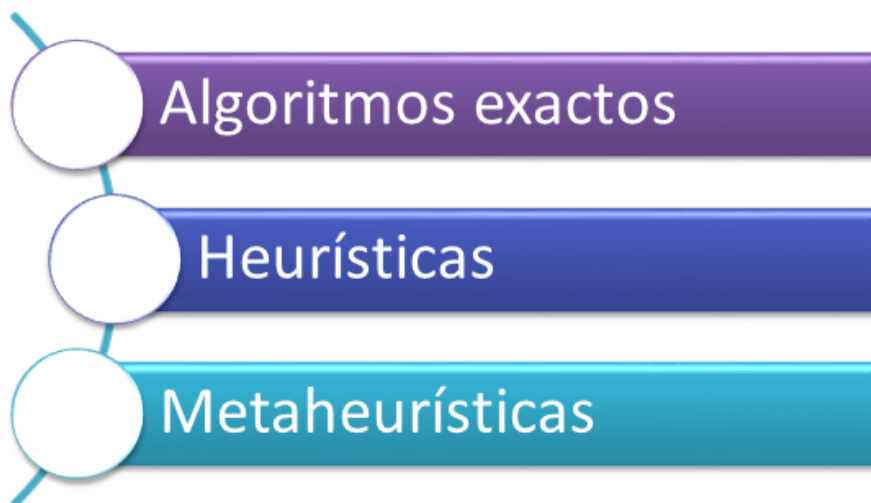
Figura 19

Gestión de operaciones. Recuperado de Geo tutoriales. (2015).



El primer paso a seguir en la metodología de la investigación de operaciones es la definición del problema para tener una mayor exactitud de lo que está afectando a la organización, las variables que interfieren, y los posibles métodos de solución. Teniendo clara la problemática que se presenta, se pasa a la construcción y formulación de un modelo matemático, en el que las ecuaciones diseñadas permitan ver un panorama general del problema. Posterior a esto, se identifican las alternativas de solución al modelo, mediante programas computacionales que emplean algoritmos dependiendo de las características dadas. En la fase de validación, se demuestra que la solución cumple con las condiciones propias del problema. Habiendo cumplido con las fases anteriores, se procede a implementar la solución alcanzada y llevar un control de los resultados obtenidos.

En la investigación de operaciones existen diferentes métodos de solución de acuerdo al problema. Sin embargo, para el SPRP (problema de enrutamiento del selector único) se encuentran tres.

Figura 20*Métodos de solución*

4.3.1 Problemas de Optimización

Problemas que son estudiados con el objetivo de mejorar su rendimiento en algún aspecto puntual. En estos problemas existen variables a las que se le invierte la mayor parte de tiempo de una investigación, para encontrar los valores con los que éstas tengan mejores resultados para maximizar o minimizar la función objetivo.

Las variables representan incógnitas que deben ser determinadas a través de la solución de un modelo, los parámetros representan valores conocidos en el sistema, las restricciones representan las relaciones entre las variables y las magnitudes que acotan a variables factibles la solución y la función objetivo es una relación matemática entre variables de decisión, parámetros y la magnitud que representa el objetivo del sistema.

4.3.2 Optimización Combinatoria

Los problemas de optimización combinatoria presentan complejidad a la hora de resolverse debido a la cantidad de soluciones factibles que se tienen. Los algoritmos de optimización

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

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.

El primer paso para resolver un problema es encontrar un algoritmo que lo resuelva y cuando ya se ha resuelto se plantea probar nuevos algoritmos para evaluar mejores posibles soluciones.

4.3.2.1 Complejidad Computacional. La complejidad computacional de un problema está centrada en clasificar problemas computacionales según su nivel de dificultad y se define como el estudio de los recursos computacionales que son necesarios para resolver un problema. Es ese sentido, un problema se considera difícil si su solución requiere gran cantidad de recursos.

- Clase P: Esta clase de complejidad es vista como una abstracción matemática para modelar esas tareas computacionales que admiten un algoritmo eficiente, contiene problemas de decisión que pueden resolverse en un tiempo polinómico.

- Clase NP: Se suele decir que la mayoría de los problemas de gran interés en la computación pertenecen a esta categoría. La clase NP contiene problemas para los que existe un algoritmo de solución que se ejecuta en un tiempo polinomial en una hipotética máquina no determinística.

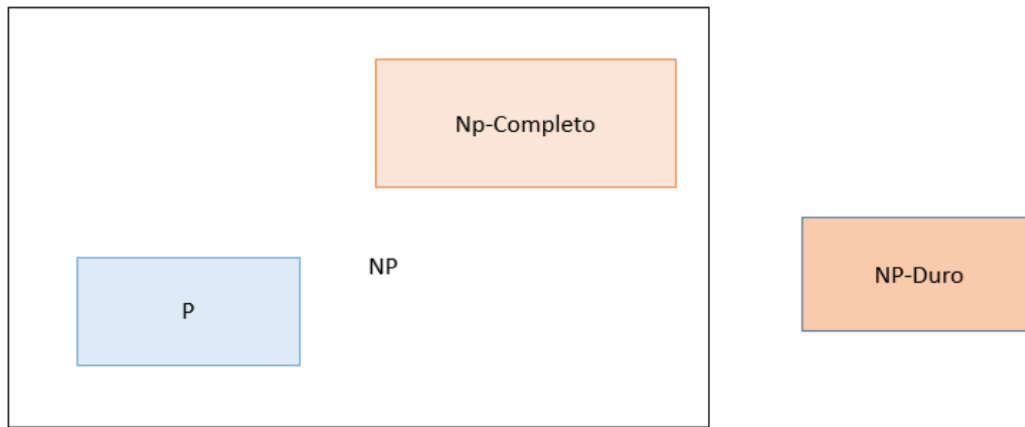
- Clase NP-Hard: Esta clase contiene problemas de decisión, optimización o búsqueda que son como mínimo tan difíciles como un problema NP (López Restrepo & Rojas Paredes, 2016).

- Clase NP- completo: Esta clase contiene problemas que son más difíciles que los de la clase NP, es decir, problemas que están entre la intersección del NP y el NP-hard (López Restrepo & Rojas Paredes, 2016).

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 21

Tipos de complejidad Computacional.



Nota. Adaptado a Duarte, A., Patringo, J. J., Gallego, M. (2008). Introducción a la optimización.

En S, Meléndez (Eds.), Metaheurísticas (pp.11). Madrid. España: Dykinson

4.3.3 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.

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

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

una extensión de la solución parcial actual no es posible, se va hacia atrás para una solución parcial corta y se trata nuevamente, Aitana Vidal Esmorís. (2013). Algoritmos heurísticos en optimización (tesis de maestría). Universidad de Santiago de Compostela, España.

4.3.4 Heurísticas

La palabra heurística es de origen griego y significa “descubro”, “encuentro”; son un conjunto de técnicas o métodos que permiten resolver un problema, se les conoce como el arte de inventar y van ligadas al pensamiento divergente o lateral de las personas. Según la literatura se encuentran los siguientes conceptos,

“Una heurística tiene como objetivo estudiar los métodos y reglas de descubrimiento o ayudar en la resolución de problemas, que es un proceso sistemáticamente tratado para alcanzar un objetivo preconcebido, pero no inmediatamente alcanzable”, (Zanakis & Evans, 1981).

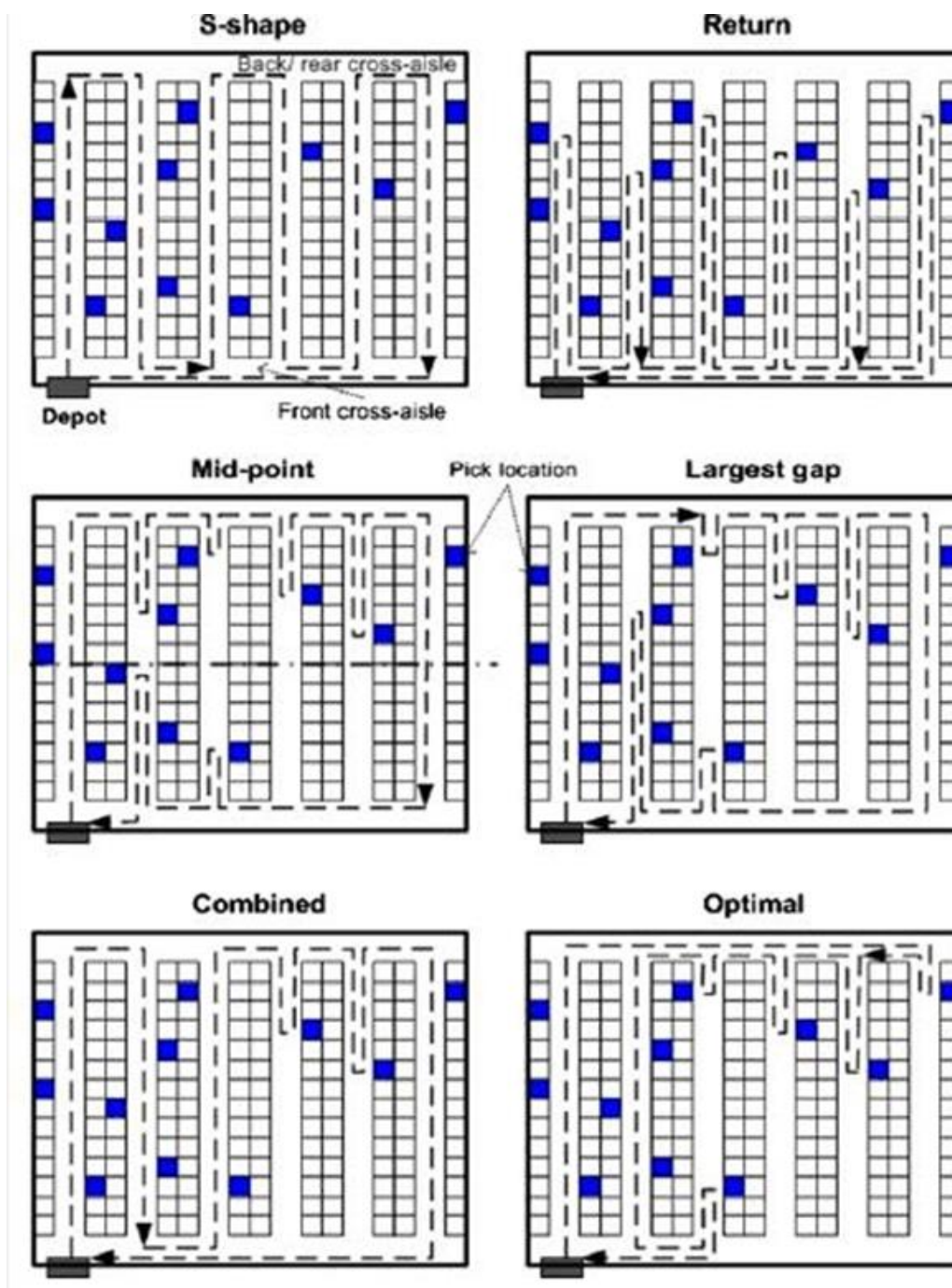
“Una técnica heurística (o simplemente una heurística) es un método que busca buenas soluciones (es decir, soluciones cercanas al óptimo) a un costo computacional razonable sin poder garantizar optimalidad”, (Reeves, 1995).

Mediante las definiciones anteriores se concluye que las heurísticas son un método de solución a problemas que ofrecen buenos resultados, pero no garantiza que las soluciones sean óptimas. La Recuperado de oodbergen, K. J., & De Koster, R. (2001a).European Journal of Operational Research., muestra los métodos heurísticos más reconocidos en la literatura para problemas de ruteo en almacenes

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 22

Routing order pickers in a warehouse with a middle aisle



Recuperado de oodbergen, K. J., & De Koster, R. (2001a).European Journal of Operational Research.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

- S shape: Es bastante popular y productivo en las industrias, con respecto a distancias de viaje.
- Retorno: El picking con retorno es otro de los sistemas más simple de separación. Una ruta de retorno consiste en que el operador de bodega entra y sale de un pasillo por el mismo extremo.
- Punto medio: Para esta estrategia la bodega se divide en dos por medio de una línea imaginaria, El operador de bodega sólo tiene permitido acceder hasta la mitad del pasillo y luego debe devolverse por el extremo que usó para entrar al pasillo.
- Brecha más grande: El operador de bodega entra en un pasillo tan lejos como la mayor “gap” de distancia en tal pasillo. El gap representa la separación que existe entre dos productos adyacentes, entre el primer producto de separación y el extremo inicial del pasillo, o entre el último producto de separación y el extremo final del pasillo.
- Compuesto: Se caracteriza por combinar el retorno y la S shape, de modo que el selector puede atravesar por completo el pasillo o regresar al extremo delantero donde ingreso.
- Óptimo: El operador de bodega sigue una ruta determinada en la que recoge todos los artículos demandados sin necesidad de recorrer distancias innecesarias.

4.3.5 Metaheurísticas

En la literatura se encuentran diversas definiciones para el concepto metaheurística, como, por ejemplo,

“Se definen como algoritmos independientes de problemas de alto nivel que proporcionan un conjunto de pautas o estrategias para encontrar una solución aproximada para el problema”, (Sörensen, 2015).

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

De acuerdo a esto, se puede determinar que las metaheurísticas son heurísticas de un mayor nivel, propia de problemas complejos tipo combinatorios o NP-Hard; y que proporcionan soluciones muy aproximadas a la óptima.

Las metaheurísticas se caracterizan por ser inspiradas en situaciones basadas en la naturaleza, en el aprendizaje, en la evolución, en la gravedad, entre otras (Zanakis & Evans, 1981). Algunos ejemplos de metaheurísticas más reconocidas en la literatura para dar solución a problemas de enrutamiento de recolectores en almacenes son:

4.3.5.1 Algoritmo Genético (GA). Este tipo de algoritmo fue creado por Henry Holland en el año de 1975 y se basan en la teoría de evolución de Darwin (Holland, 1975). Se encuentran dentro de los algoritmos evolutivos e imitan aspectos del comportamiento humano, tales como el aprendizaje, la percepción, la evolución y la adaptación (Veslin, 2014).

Los algoritmos genéticos usan una búsqueda de tipo poblacional y se caracterizan por convertir el universo de soluciones en cadenas de tipo binarias las cuales se conocen como cromosomas, durante su ejecución, se implementan tres operadores naturales: la selección, el cruce o apareamiento y la mutación; posteriormente, se hacen las evaluaciones de los cromosomas y se selecciona los mejores individuos para que perdure su herencia por medio del cruce, mientras que el resto de individuos mueren o son mutados de acuerdo a los parámetros que se definan en el algoritmo (Escobar et al., 2015).

4.3.5.2 Optimización de Enjambre de Partículas (PSO). La metaheurística de enjambre de partículas fue definida por James Kennedy y Russell Eberhart en 1995, es usado para resolver problemas no lineales y está orientado a encontrar mínimos o máximos globales (Kennedy & Eberhart, 1995).

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Su funcionamiento está inspirado en el comportamiento que tienen las bandadas de pájaros o bancos de peces en los que, el movimiento de cada individuo (dirección, velocidad, aceleración...), es el resultado de combinar las decisiones individuales de cada uno con el comportamiento del resto (Rodrigo, 2019).

Al igual que el algoritmo genético, la optimización de enjambre de partículas (PSO) es de tipo poblacional. Lo que busca el algoritmo es que las partículas giren en torno a la que presenta mejor ubicación, conocida como el líder, a su vez este líder podría ser remplazado en el momento en que una partícula mejore su ubicación con respecto a la función de adaptación.

4.3.5.3 Optimización por Colonia de Hormigas (ACO). La metaheurística conocida como colonia de hormigas fue creada por Marco Dorigo en 1992 y está inspirada en el estudio de la naturaleza, en donde se observó cómo las hormigas dejaban rastros de feromonas para guiar a la colonia en la búsqueda de alimento (Dorigo, 1992).

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. Se basan en una colonia de hormigas artificiales, esto es, unos agentes computacionales simples que trabajan de manera cooperativa y se comunican mediante rastros de feromona artificiales (Alonso et al, 2003). La metaheurística cuenta con tres mecanismos para encontrar la mejor solución, el primero es por medio de la explotación que consiste en seguir la configuración con mayor rastro de feromonas, el segundo es el mecanismo de exploración que se basa en que no todas las hormigas sigan el mayor rastro de feromonas lo que permite conocer nuevas configuraciones (soluciones) y el tercero es el mecanismo de evaporación de feromona que consiste en equilibrar la exploración y explotación para permitir al metaheurístico converger de manera oportuna y salir de óptimos locales (Dorigo, 1992), (Escobar et al., 2015).

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

4.3.5.4 Recocido Simulado (SA). La metaheurística de recocido simulado fue propuesta por Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi en 1983 y 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 que se vuelve líquido, a continuación, la temperatura se disminuye de forma paulatina para obtener una estructura cristalina sin defectos (estado basal) (Hernández et al, 2011).

El algoritmo de recocido simulado (SA) es un método iterativo que inicia con un cierto estado s . Mediante un proceso particular genera un estado vecino s' al estado actual. Si la energía, o evaluación, del estado s' es menor que la del estado s , se cambia el estado s por s' . Si la evaluación de s' es mayor que la de s entonces se puede empeorar eligiendo s' en lugar de s con una cierta probabilidad que depende de las diferencias de las evaluaciones $\Delta f = f(s) - f(s')$ y de temperatura actual del sistema T (Departamento de Matemáticas, CSI/ITESM, 2008).

4.3.5.5 Búsqueda Tabú (TS). La metaheurística de búsqueda Tabú fue creada por Fred Glover en 1989 y es implementada en problemas complejos. Está inspirada en algunos conceptos de la inteligencia artificial, tales como la memoria adaptativa (memoria a corto y largo plazo) y la exploración sensible, que permite extraer información de la selección de configuraciones (soluciones) malas y buenas para guiar la búsqueda (Escobar et al., 2015).

La búsqueda Tabú es de tipo local y 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.

Las estructuras de memoria de la TS funcionan mediante referencia a cuatro dimensiones principales consistentes en la propiedad de ser recientes en frecuencia, en calidad y en influencia,

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

estas dimensiones se fijan contra unos antecedentes de conectividad y estructuras lógicas (Glover et al,1989).

La búsqueda tabú presenta tres tipos de memoria principalmente:

1. Memoria de corto plazo: Se encarga de guardar la lista de los movimientos recientes con el fin de evitar regresar a un óptimo local en iteraciones pasadas.

2. Memoria de mediano plazo: Es de ayuda para encaminar la búsqueda en los atributos comunes de las mejores soluciones que se han dado.

3. Memoria de largo plazo: Dirige la búsqueda a regiones que no han sido exploradas, para evitar quedarse en máximos o mínimos locales.

El énfasis en la exploración responsiva considerada en la búsqueda tabú deriva de la suposición de que una mala elección estratégica puede proporcionar más información que una buena elección realizada al azar, dado que una elección estratégica mala puede proporcionar pistas útiles sobre cómo guiar la búsqueda hacia zonas prometedoras. Por lo tanto, la exploración responsiva integra los principios básicos de la búsqueda inteligente; explota las características de las soluciones buenas a la vez que explora nuevas regiones prometedoras (Melian & Glover, 2003).

La metaheurística de búsqueda Tabú, presenta los siguientes pasos,

- Paso 1

Se genera una solución inicial que se puede obtener mediante algoritmos heurísticos o forma aleatoria, debe ser factible ya que se debe iniciar la búsqueda por una solución de buena calidad para tener niveles altos de aceptación.

- Paso 2

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Se elige el vecindario o entorno de la solución inicial, en el que se generaran nuevas soluciones. Para poder generar el vecindario se aplican técnicas conocidas como: Intercambio, inserción, entre otras.

- Paso 3

Se evalúa la función objetivo, teniendo la nueva solución se verifica que sea mejor que la anterior, y si no cumple se pasa al paso 4.

- Paso 4

Se centra en actualizar la mejor solución. Partiendo que la solución encontrada es mejor que la anterior se procede a tomarla como el nuevo punto de partida y se repiten los pasos mencionados anteriormente, también se debe actualizar la lista tabú reemplazando los valores más antiguos por los nuevos encontrados.

- Paso 5

Se ejecuta el algoritmo hasta llegar al criterio de parada, que puede ser definido luego de tener cierto número de iteraciones, cantidad de iteraciones sin mejora y el tiempo de ejecución.

4.3.6 Herramienta computacional Matlab

La herramienta computacional a utilizar para la solución del problema SPRP es Matlab, un software matemático con entorno de desarrollo integrado; se utiliza dicha herramienta porque proporciona un lenguaje de programación flexible y ágil facilitando lo requerido en esta investigación.

Matlab es compatible con los sistemas operativos Microsoft Windows, Unix, mac OS y GNU/Linux. Matlab ofrece la manipulación de matrices, implementación de algoritmos diseñados

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

previamente, creación de interfaz de usuario, comunicación con programas lenguajes diferentes y presentación de datos y funciones.

4.3.6.1 Descripción del lenguaje de programación Matlab. El lenguaje de programación Matlab es uno de los lenguajes más reconocidos a nivel mundial por millones de ingenieros y científicos, que sirve como herramienta para analizar y diseñar sistemas de aprendizaje automático, procesamiento de señales, procesamiento de imágenes, diseño de control, robótica, entre otros campos (Descripción del producto MATLAB- MATLAB & Simulink- MathWorks España, 2020). Se opta por este lenguaje de programación, ya que es un programa interactivo orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos.

En el mundo industrial, Matlab está siendo utilizado como herramienta de investigación para la resolución de complejos problemas planteados en la realización y aplicación de modelos matemáticos en ingeniería. Los usos más característicos de la herramienta se encuentran en áreas de computación y cálculo numérico tradicional, prototipaje algorítmico, teoría de control automático, estadística, análisis de series temporales para el proceso digital de señal. (Descripción del producto MATLAB- MATLAB & Simulink- MathWorks España, 2020).

Características de Matlab

- Cálculos intensivos desde un punto de vista numérico.
- Gráficos y visualización avanzada.
- Lenguaje de alto nivel basado en vectores arrays y matrices.
- Colección muy útil de funciones de aplicación.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

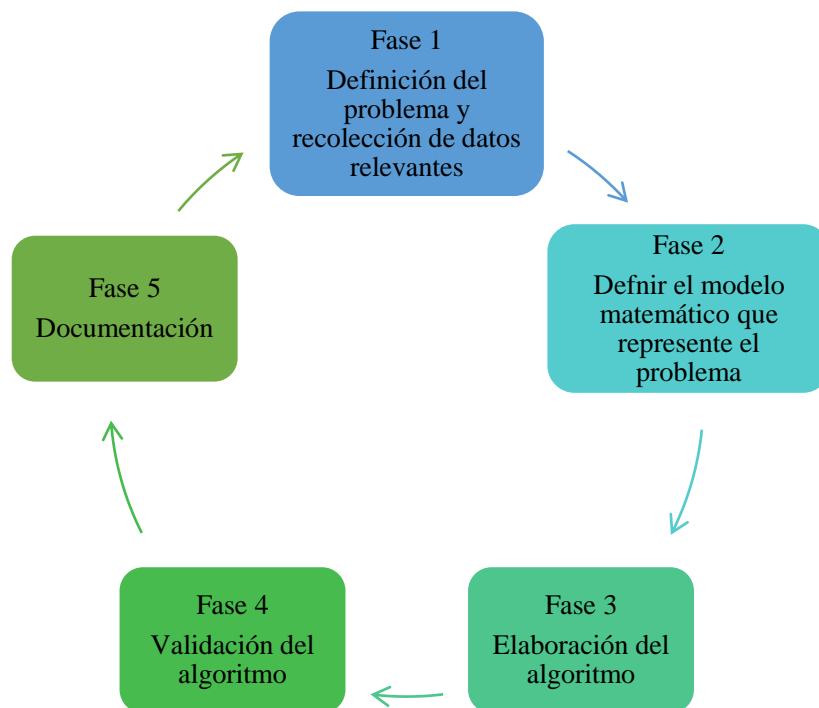
- Entorno de escritorio optimizado para la exploración iterativa, el diseño y la solución de problemas.
- Toolboxes complementarias para una amplia variedad de aplicaciones científicas y de ingeniería.

5. Metodología

En el presente trabajo de investigación se llegó a la solución del problema de enrutamiento de un recolector (SPRP) en un almacén de comercio electrónico con almacenamiento disperso y múltiples depósitos, mediante la metaheurística Búsqueda Tabú, la cual es bastante conocida en la literatura. Se seguirán las siguientes etapas para su desarrollo:

Figura 23

Fases de la metodología.



BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Fase 1. Definición del problema y recolección de datos relevantes

- Revisión de literatura sobre el problema de enrutamiento de un selector en almacenes de comercio electrónico.

- Revisión de literatura sobre los modelos matemáticos para problemas de enrutamiento de un selector.

- Revisión de literatura sobre algoritmos planteados anteriormente para dar solución al problema de enrutamiento de un selector.

Fase 2. Definir el modelo matemático que represente el problema

- Selección de un modelo matemático entre los ya existentes identificado en la revisión de la literatura para el problema de enrutamiento de un selector en un almacén de comercio electrónico.

- Describir el problema de enrutamiento de un selector en un almacén con almacenamiento disperso y múltiples depósitos con su función objetivo, variables, parámetros y restricciones.

Fase 3. Elaboración del algoritmo

- Estudiar y comprender el lenguaje de computación MatLab por medio de cursos virtuales y asesorías solicitadas a integrantes del grupo de investigación OPALO.

- Estudiar y analizar las bases teóricas del algoritmo Búsqueda Tabú (TS) aplicadas al problema de enrutamiento de un recolector (SPRP).

- Construir el algoritmo Búsqueda Tabú para la solución del problema de enrutamiento de un recolector (SPRP), debido a que, a diferencia de otros algoritmos, éste presenta la ventaja de mantener información almacenada sobre las últimas soluciones visitadas convirtiéndose en una búsqueda inteligente; Además dada la novedad del problema se busca ampliar los tipos de

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

algoritmos de solución mediante una metaheurística que se adapte a las condiciones de complejidad computacional.

Fase 4. Validación del algoritmo

- Probar el algoritmo elaborado para que arroje soluciones factibles y pertinentes al problema de investigación.
- Búsqueda de otras investigaciones en las que se haya abordado el problema de enrutamiento de un recolector (SPRP).
- Determinar las instancias basadas en datos determinísticos y otros datos que se generan aleatoriamente de acuerdo al trabajo de “Picker routing in the mixed-shelves warehouses of e-commerce retailers”.
- Comparar las soluciones de dicha investigación con las arrojadas mediante el algoritmo desarrollado en el proyecto.
- Analizar e interpretar los resultados obtenidos.

Fase 5. Documentación

- Elaboración del documento del 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

El problema a tratar en esta investigación es el enrutamiento de un recolector en almacenes de comercio electrónico con múltiples depósitos y almacenamiento disperso, para abordar dicho problema se realizó una revisión de los modelos propuestos en la literatura para representar el problema y el que se adoptará el propuesto por Weidinger, Boysen y Schneider (2019).

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

6.1 Descripción del problema

Se considera un almacén con estanterías mixtas, también conocido como almacenamiento disperso, el cual consiste en organizar los productos de forma aleatoria en diferentes estantes, de modo que el selector tenga la oportunidad de encontrar los artículos demandados en un menor tiempo debido a que aumenta la probabilidad de encontrarlos en distancias menores, con un único recolector ubicado en un depósito arbitrario, el cual transporta por medio de un carro los artículos demandados. Se quiere lograr una solución que defina la ruta del recolector a través del almacén con un mínimo de distancia total recorrida.

El problema reside en la programación para un conjunto de O ordenes de pedido $O = \{1, 2, \dots, o\}$, 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 $S = \{1, 2, \dots, s\}$.

Las condiciones y restricciones del problema son las siguientes:

- Este problema cuanta con n depósitos en los que se pueden entregar los pedidos, entendiéndose depósito como el lugar en el que el selector deposita la orden de pedido completa.
- Tiene una secuencia máxima de posición, que se refiere a la última posición a la que llega el selector para completar el pedido (Cabe destacar que todo pedido inicia en un depósito y finaliza en un depósito).
- El carro de picking puede procesar pedidos en paralelo y tiene una capacidad C .
- Solo se considera un único selector de pedidos, por tanto, no habrá selectores bloqueándose entre sí frente a los estantes, los depósitos o en los pasillos.
- Los artículos de una misma SKU son válidos para satisfacer un pedido.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

- Cada orden de pedido se genera de forma aleatoria y el número de artículos es igual al número que representa la orden de pedido. Por ejemplo, si se requieren 3 pedidos, cada pedido tendrá solo 3 artículos de los cuales solo puede haber máximo 2 SKU diferentes.
- Todos los contenedores tienen el mismo tamaño.

6.2 Modelo Matemático

6.2.1 Formulación del problema

El siguiente modelo es el propuesto por Weidinger, Boysen y Schneider (2019) expuesto en su artículo “Picker routing in the mixed-shelves warehouses of e-commerce retailers

Índices

Los índices del modelo son:

S: conjunto de SKU

O: número de órdenes de pedido

D: depósitos

m: máxima secuencia de posición

V: conjunto de posiciones de almacenamiento unidas con depósitos

Parámetros

v^0 : posición de inicio del selector en el depósito

P: posiciones de almacenamiento

P_s : conjunto de posiciones de almacenamiento de cada SKU

C: capacidad de carro de picking

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

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

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

$d_{vv'}$: Distancia entre las posiciones v y v'

M : un número muy grande

Variables

$X_{v,i}$ {	1 Si v se visita en posición de secuencia i 0 de lo contrario
K_{io}^s {	1 Si orden de selección o comienza en posición i 0 de lo contrario
K_{io}^e {	1 Si orden de selección o termina en posición i 0 de lo contrario
$\Phi_{vv'i}$ {	1 Si v es predecesor directo de v' en posición i 0 de lo contrario
δ_{vio}	Cantidad de artículos recogidos en la posición v para pedido o en posición de secuencia i

Modelo

$$F = \sum_{v \in V} \sum_{v' \in V} \sum_{i=1}^m \Phi_{vv'i} * d_{vv'} \quad (1)$$

Restricciones

$$\sum_{v \in V} X_{vi} \leq \sum_{v \in V} X_{v(i-1)} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{v \in V} X_{v0} \leq 1 \quad \forall v \in P \quad (3)$$

$$\sum_{o \in O} \sum_{i=0}^m \delta_{vio} \leq \gamma_v \quad (4)$$

$$\sum_{v \in P_s} \sum_{i=0}^m \delta_{vio} = a_{os} \quad \forall o \in O; s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^m K_{io}^s = 1 \quad \forall o \in O \quad (6)$$

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

$$\sum_{i=0}^m K_{i0}^e = 1 \quad \forall_o \in O \quad (7)$$

$$\sum_{o \in O} (K_{i0}^s + K_{i0}^e) \leq M \sum_{v \in D} x_{vi} \quad \forall_i = 0, \dots, m \quad (8)$$

$$\sum_{o \in O} \delta_{vio} \leq M * x_{vi} \quad \forall_v \in V \quad i = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$\sum_{v \in P} \delta_{vio} \leq M * \sum_{i'=0}^i (k_{i'o}^s - k_{i'o}^e) \quad \forall_o \in O, \quad i = 1, \dots, m \quad (10)$$

$$\sum_{i'=0}^i \sum_{o \in O} (K_{i'o}^s - K_{i'o}^e) \leq C \quad \forall_i = 1, \dots, m \quad (11)$$

$$\phi_{vv'i} + 1 \geq x_{v(i-1)} + x_{v'i} \quad \forall_{v,v'} \in V, \quad i = 1, \dots, m \quad (12)$$

$$x_{v(i-1)} + x_{vi} \leq 1 \quad \forall_v \in V, \quad i = 1, \dots, m \quad (13)$$

$$x_{vi} \leq \sum_{o \in O} \delta_{vio} \quad \forall_v \in P, \quad i = 0, \dots, m \quad (13)$$

$$x_{v^o0} = 1 \quad (15)$$

$$\delta_{vio} \geq 0 \quad \forall_v \in V; \quad o \in O; \quad i = 0, \dots, m \quad (16)$$

$$x_{vi}, k_{i'o}^s, k_{i'o}^e, \phi_{vv'i} \in \{0,1\} \quad \forall_{v,v'} \in V; \quad o \in O; \quad i = 0, \dots, m \quad (17)$$

Las restricciones (2) y (3) aseguran que las visitas de posición en el almacén estén bien secuenciadas, la restricción (4) hace referencia a que el Stock de artículos disponible en un estante no se exceda durante la preparación de pedidos, la restricción (5) asegura que se satisfagan los pedidos de los clientes, las restricciones (6) y (7) determinan que cada orden tiene solo un punto inicial y un punto final, la restricción (8) asegura que seleccionar un pedido específico solo puede empezar y finalizar en un depósito, la restricción (9) hace referencia a que los SKU solo se pueden seleccionar en las posiciones de almacenamiento correspondientes, cada pedido tiene un lapso de

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

tiempo para ser recogido por lo que en la restricción (10) solo se pueden seleccionar artículos mientras el periodo de tiempo este activo. La capacidad del carrito del recolector está considerada en la restricción (11), la variable auxiliar utilizada para linealizar la función objetivo está contemplada en la restricción (12). En las restricciones (13) y (14) se establece que no se puede visitar la misma posición dos veces seguidas y que las posiciones de almacenamiento solo se visitan si se satisface la demanda. El inicio del recorrido del selector se encuentra en la restricción (15) y, por último, los dominios de las variables están dados por las ecuaciones (16) y (17).

6.2.2 Descripción del Vecino más Cercano

El vecino más cercano, considerado uno de los métodos heurísticos más usados en la literatura, es un ejemplo de una buena heurística de propósito general válida para varios problemas combinatorios (Ramos, 1995). Es un algoritmo de tipo goloso o greedy, se les llama así porque en cada paso hacen lo que es mejor para ese estado, sin tener en cuenta los estados posteriores y anteriores (Ríos Mercado & González Velarde, 2000). Es un procedimiento constructivo en donde se parte de elegir un vértice inicial, una vez seleccionado este, se medirá la distancia que hay de este hacia los otros, y se procede al que tenga la distancia menor respecto al vértice inicial. De esta forma se obtiene una trayectoria $j_1, j_2, j_3, \dots, j_k, j_{k+1}, \dots, j_n$, donde el vértice j_{k+1} se elige tomando la mínima distancia que hay desde j_k hasta cada uno de los vértices que sean distintos de los ya elegidos y j_1 es el vértice inicial del recorrido. Al terminar se debe agregar el arco que va del vértice j_n hasta el vértice j_1 (Ríos Mercado & González Velarde, 2000).

6.2.3 Descripción de Búsqueda Tabú

La búsqueda tabú surge como una herramienta para explorar un espacio de soluciones más allá del óptimo local; toma de la inteligencia artificial el concepto de memoria y lo implementa

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

con el objetivo de realizar la búsqueda teniendo en cuenta su historia, es decir, se extrae la información teniendo en cuenta lo sucedido anteriormente y con base en esto se actúa (Riojas, 2005). De este modo se puede decir que búsqueda es inteligente, ya que, permite moverse de una solución a otra, aunque no sea tan buena como la actual, permitiendo así salir de óptimos locales y buscar mejores soluciones (Riojas, 2005).

Según Melián & Glover (2004) el uso de memoria de la búsqueda Tabú funciona con base en cuatro dimensiones que consisten en la propiedad de ser reciente, en su frecuencia, la calidad e influencia. Las memorias basadas en lo reciente y la frecuencia deben ser complementarias para así lograr el balance que los procesos de búsqueda heurística deben poseer. La dimensión de calidad es un incentivo para reforzar las acciones que conducen a buenas soluciones y penalizar las que conducen a soluciones no deseadas, la frecuencia por su parte, tiene en cuenta el impacto de las decisiones tomadas durante la búsqueda, tanto en la calidad como en la estructura.

6.2.3.1 Lista Tabú. La lista Tabú es donde se registran las soluciones o atributos que no deben ser elegidos. Una de las formas más usuales es que se penalicen los elementos de dicha lista durante cierto tiempo, es decir, si un movimiento está en la lista tabú no será aceptado, aunque aparentemente sea una buena solución. La lista Tabú contiene soluciones visitadas recientemente, movimientos realizados recientemente y atributos que tenían las soluciones visitadas (Riojas, 2005).

6.2.3.2 Fundamentos. Explorar las formas de memoria adaptativa para controlar el proceso de búsqueda es clave, se debe diferenciar entre la memoria a corto y largo plazo, ya que, cada una de ellas va acompañada de sus propias estrategias. Las funciones de memoria de corto plazo son uno de los elementos más importantes de la búsqueda Tabú, ya que, sirven para continuar más allá de la optimalidad local, ayudando a la ejecución de movimientos, esta memoria está

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

basada en la historia reciente de la trayectoria de la búsqueda; la memoria a corto plazo más usada en la literatura almacena atributos de soluciones que han cambiado en el pasado reciente, y se le conoce como memoria basada en lo reciente; Para algunas aplicaciones, la memoria a corto plazo resulta ser suficiente para producir soluciones de gran calidad, pero en otros casos es necesario incluir la memoria de largo plazo y las estrategias asociadas a la misma para obtener soluciones deseadas (Melián & Glover, 2004).

7. Diseño del algoritmo de Búsqueda Tabú

Para aplicar Búsqueda tabú es necesario suministrar un vector inicial, no obstante, se debe proporcionar los parámetros de entrada para determinar la matriz distancia, matriz V , vector inicial y ejecutar Tabú, tales parámetros son escalares y se denominan: cantidad de pasillos (Cant_Pasillo), longitud de pasillos (long_Pasillo), cantidad de depósitos (Cant_Deposito), número SKU o cantidad máxima de pedidos (SKU), Pick lista (Pedido) y número tabú (Numero_Tabu).

7.1 Matriz V

La matriz V consta de tres vectores adjuntados: (1) primera columna o posición, (2) segunda columna o producto (SKU) y (3) tercera columna o número de elementos almacenados, como se muestra a continuación:

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 24

Pseudocódigo de la Matriz V

<i>Algoritmo: Matriz V</i>
<i>Entrada:</i> (Cant_Pasillo), (long_Pasillo), (Cant_Deposito), (SKU) y (Pedido). <i>Salida:</i> Matriz V
<pre> %Primera columna de la matriz V Etapa 1. Primer elemento para obtener el primer vector de la matriz V Posicion=[1]; Etapa 2. A= (2*Cant_Pasillo*long_Pasillo); Etapa 3. Repetir hasta (A-1); { Etapa 4. i=i+1; Etapa 5. Posicion=[Posicion,i]; } Etapa 6. Terminar y reportar Posicion=Posicion'; %Primera columna de la matriz V %Segunda columna de la matriz V Etapa 7. Primer elemento del segundo vector de la matriz V SKU_j=1; Etapa 8. Elemento que permitirá utilizar únicamente SKU impares X=1; Etapa 8. Si (SKU/2) es cero (0) entonces; { Etapa 9. Repetir hasta (SKU/2) Etapa 10. X=X+2; Etapa 11. SKU_j=[SKU_j,X]; Etapa 12. Terminar y reportar SKU_j; } De lo contrario { Etapa 13. Repetir hasta ((SKU-1)/2) Etapa 14. X=X+2; Etapa 15. SKU_j=[SKU_j,X]; Etapa 16. Terminar y reportar SKU_j; } Etapa 17. Producto_2=[]; Etapa 18. Repetir hasta A { Etapa 19. Repetir hasta la longitud del vector SKU_j; { Etapa 20. Producto_1=SKU_j; } Etapa 21. Terminar y reportar Producto_2=[Producto_2,Producto_1]; } Etapa 22. Terminar y reportar Producto_2; Etapa 23. Repetir hasta A; { Etapa 24. Producto=Producto_2; } Etapa 25. Terminar y reportar Producto=Producto'; %Segunda columna de la matriz V %Primera columna de la matriz V Etapa 26. Vector de elementos 2 de 1x20 Elem_Almacenado; Etapa 27. Terminar y reportar V=[Posicion, Producto, Elem_Almacenado]; %Primera columna de la matriz V </pre>

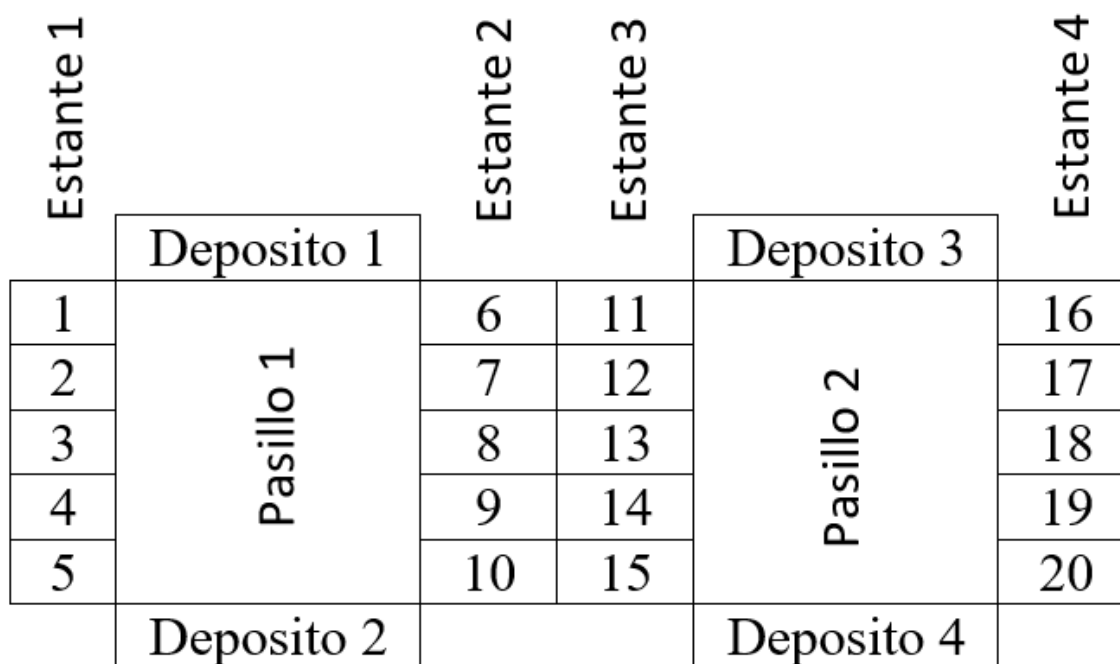
BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

7.2 Matriz Distancia

Para explicar ilustrativamente la forma de determinar la matriz distancia, se toma como ejemplo un almacén con 20 posiciones, 4 depósitos y dos pasillos como se muestra en la **Figura 25**.

Figura 25

Ejemplo para la matriz Distancia



7.3. Elementos de la matriz distancia cuando se encuentra en el mismo pasillo

La matriz se llena de fila en fila, comenzando por la fila 1 (elemento i) y la columna 1 (elemento j). Cuando es igual pasillo se realiza una resta de la columna de la matriz distancia (j-donde se dirige el recepcionista) con la fila de la matriz distancia (i-donde se encuentra el recepcionista), es decir $Mat_Distancia(i,j)=abs(j-i)$ y cuando i o j es mayor a long_Pasillo, dicho valor se le resta long_Pasillo, es decir, para el caso que i sea mayor que long_Pasillo,

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

$Mat_Distancia(i,j)=abs(j-(i- long_Pasillo))$ y si j es mayor que $long_Pasillo$,
 $Mat_Distancia(i,j)=abs((j-long_Pasillo)-i)$.

Cuando están en distinto pasillo se debe tener cuidado con el estante al que se encuentra el elemento i y el elemento j , pues es indispensable para la matriz distancia, como se muestra a continuación:

Figura 26

Matriz Distancia para diferente pasillo.

<p>Algoritmo: <i>Matriz Distancia</i></p> <p>Entrada: <i>long_Pasillo y A</i></p> <p>Salida: <i>Matriz Distancia (Mat_Distancia)</i></p>
<p>Etapa 1. si $i > long_Pasillo$</p> <p>{</p> <p> Etapa 2. $i=i-(long_Pasillo*(número\ de\ estante-1));$</p> <p> Etapa 3. si $j > long_Pasillo$</p> <p> {</p> <p> Etapa 4. $j=j-(long_Pasillo*(número\ de\ estante-1));$</p> <p> Etapa 5. $Mat_Distancia(i,j)=(5*abs(número\ de\ estante(i)-número\ de\ estante(j)))+abs(j-i);$</p> <p> }</p> <p> }</p> <p>Etapa 6. Terminar y reportar $Mat_Distancia$;</p>

7.4. Matriz Deposito

Una matriz depósito en una matriz de dimensiones $A \times Cant_Deposito$, para el ejemplo de la Figura 26 sería 20×4 y analizando esa misma figura, se muestra que la primera columna de la matriz depósito es un vector similar a la columna 1 de la matriz distancia, la segunda columna de la matriz depósito es similar a la columna 5 de la matriz distancia, la tercera columna de la matriz depósito es parecido a la columna 11 de la matriz distancia y la cuarta columna de la matriz depósito es parecido a la columna 16 de la matriz distancia, por ende se extrae esas columna, en

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

otras palabras, se extrae las columnas de la matriz distancia que más próximo se encuentra al depósito que se analiza, formando así una matriz depósito preliminar denominada *Mat_Deposito_1* y luego se aplica el algoritmo de la **Figura 27**.

Figura 27

Matriz Depósito.

<p>Algoritmo: Matriz Depósito Entrada: <i>Cant_Deposito, Mat_Distancia, long_Pasillo, A y Mat_Deposito_1.</i> Salida: <i>Matriz Depósito (Mat_Deposito)</i></p>
<p>Etapa 1. Repetir hasta <i>Cant_Deposito</i></p> <p>{</p> <p> Etapa 2. Repetir hasta <i>A</i></p> <p> Etapa 3. si depósito está en distinto pasillo a <i>Mat_Deposito_1(Cant_Deposito(i), A(j))</i></p> <p> {</p> <p> Etapa 4. <i>Mat_Deposito(i,j)= Mat_Deposito_1(i,j)-1;</i></p> <p> Etapa 5. En caso contrario <i>Mat_Deposito(i,j)= Mat_Deposito_1(i,j)+1;</i></p> <p> }</p> <p> }</p> <p>Etapa 6. Terminar y reportar <i>Mat_Deposito(i,j);</i></p>

7.5. Rutas a Optimizar

El Segundo vector de la matriz *V*, también denominado Producto, es un vector completo por números impares de 1 hasta SKU, como se observa en la **Figura 26**. Es importante tener presente el número de pedidos o PickList (*O*), es una variable de entrada y se aplica a la ruta inicial a cada vector de la matriz ruta a optimizar, el (*O*) indica la cantidad de filas y columnas de la matriz Ruta a optimizar (*Matriz_Optimizar*), para comprender mejor ello, se hará un ejemplo con un SKU=9 Pedidos (*O*)=3 (**Tabla 10**), cada pedido (fila de la *Matriz_Optimizar*) consta de 2 SKU's aleatorios distintos o productos distintos, apareciendo uno de esos SKU hasta 2 veces (número aleatorio entre 1 y 2) y el otro el restante de veces (SKU – el número aleatorio anterior), por ejemplo, en el pedido 1 hay 2 SKU's (1 y 5), donde el 5 aparece dos veces y el 1 aparece una vez (3-2), mientras en el pedido 2 aparece el 1 una vez y el 7 aparece 2 veces (3-1). Los SKU's

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

obtenidos en cada pedido (2 en total) se obtienen aleatorio de la segunda columna de la matriz V, es decir, el vector Producto obtenido en la Tabla 10, obteniendo, de esa forma, la matriz Ruta a optimizar (Matriz_Optimizar).

Tabla 10

Ejemplo de la Matriz Ruta a optimizar (Matriz_Optimizar)

Pedido 1	1-5-5	
Pedido 2	7-7-1	Matriz Ruta a optimizar
Pedido 3	9-3-3	

7.6. Deposito Inicial

El depósito inicial en una función aleatoria (random) que está entre 1 y cantidad de depósitos (Cant_Deposito), es decir, $\text{Deposito_Inicial} = \text{randi}([1, \text{Cant_Deposito}], 1, 1)$.

7.7. Ruta Inicial

La ruta inicial se aplica a cada pedido (ver Tabla 10), el vector de la ruta inicial comienza, para agregar un segundo elemento se debe continuar con el siguiente proceso:

a) Se busca el primer elemento del pedido 1 (para el ejemplo de la Tabla 10 es 1) en el vector Productos (segunda columna de la matriz V), comenzando desde el primer elemento, obteniendo la fila donde se encuentra el elemento.

b) Se busca en la tercera columna de la matriz V (Elem_Almacenado) la fila anteriormente obtenida (a), si dicho elemento es mayor a cero, se resta un escalar de 1, en caso contrario, se repite el proceso (a).

c) Se busca la fila obtenida en la primera columna de la matriz V (Producto) y el valor de dicho elemento se anexa a la ruta inicial.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

d) Se repite el proceso para cada elemento de su respectivo pedido y cuando finalice, se anexa el valor del depósito inicial.

La distancia asociada a la ruta se obtiene analizando la matriz depósito en los dos primeros elementos de la ruta inicial, luego la matriz distancia en el segundo-tercero, posteriormente la matriz distancia en el tercer-cuarto, hasta llegar a analizar en la matriz distancia al antepenúltimo-penúltimo elemento de la ruta y finalmente se analiza el penúltimo-último elemento de la ruta en la matriz depósito; todos los valores obtenidos se suman, obteniendo, de esa manera, la distancia asociada a la ruta. Lo anterior se resume a continuación:

Figura 28

Pseudocódigo de la ruta inicial.

<i>Algoritmo: Ruta inicial</i>
<i>Entrada: Deposito_Inicial, Producto_Optimizar, A, Producto, Mat_Deposito, Posicion, Elem_Almacenado y Mat_Distancia.</i>
<i>Salida: Ruta inicial (Ruta_Inicial)</i>
<pre> Etapa 1. Repetir hasta columnas de pedido 1 (k) { Etapa 2. Repetir hasta A (i) { Etapa 3. si Producto_Optimizar(k)==Producto(i) & k==1 { Etapa 4. Distancia=Distancia+Mat_Deposito(Deposito_Inicial,i); Etapa 5. B=i; Etapa 6. Ruta_Inicial=[Ruta_Inicial,Posicion(i)]; Etapa 7. C=Elem_Almacenado(i); Etapa 8. Elem_Almacenado(i)=C-1; Etapa 9. Romper el condicional. } Etapa 10. si Producto_Optimizar(k)==Producto(i) & k>1 & Elem_Almacenado(i)>=1 { Etapa 11. Distancia=Distancia+Mat_Distancia(B,i); Etapa 12. B=i; Etapa 13. Ruta_Inicial=[Ruta_Inicial,Posicion(i)]; Etapa 14. C=Elem_Almacenado(i); Etapa 15. Elem_Almacenado(i)=C-1; Etapa 16. Romper el condicional. } } Etapa 17. Terminar el ciclo de A } Etapa 18. Terminar el ciclo de pedido 1 y reportar Ruta_Inicial=[Ruta_Inicial,Deposito_Inicial]; Etapa 19. Reportar V=[Posicion,Producto,Elem_Almacenado]; <i>%Nuevo vector V</i> Etapa 20. Reportar Distancia=Distancia+Mat_Deposito(Deposito_Inicial,B); </pre>

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

7.8. Búsqueda Tabú

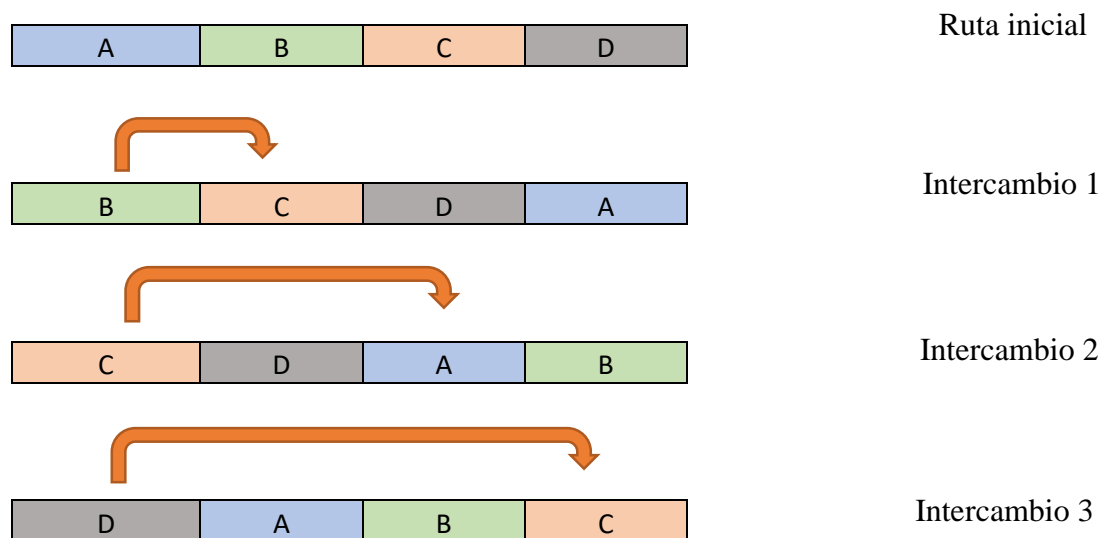
Dado que los depósitos son el inicio y el fin de la ruta, estos no participan de en el intercambio de elementos para su aplicación tabú, por ende, los elementos que entraran en intercambio de elementos son de magnitud igual al pedido 1 (pedido de la sección rutas a optimizar), cuyo ejemplo de aplicación se muestra en la Figura 29 y se puede expresar mediante la ecuación (18), dicha ecuación es el número total de nuevo vectores que se genera. Los intercambios se aplican a la ruta inicial sin tener presente primer y último elemento.

$$\binom{m}{n} = \frac{m!}{n!(m-n)!} \quad (18)$$

Donde m es el número de elementos del vector a analizar y n es el número de nodos intercambiados en una iteración, siendo para tabú de 2 (Sánchez, 2020).

Figura 29

Intercambio de nodos para el algoritmo metaheurística Tabú

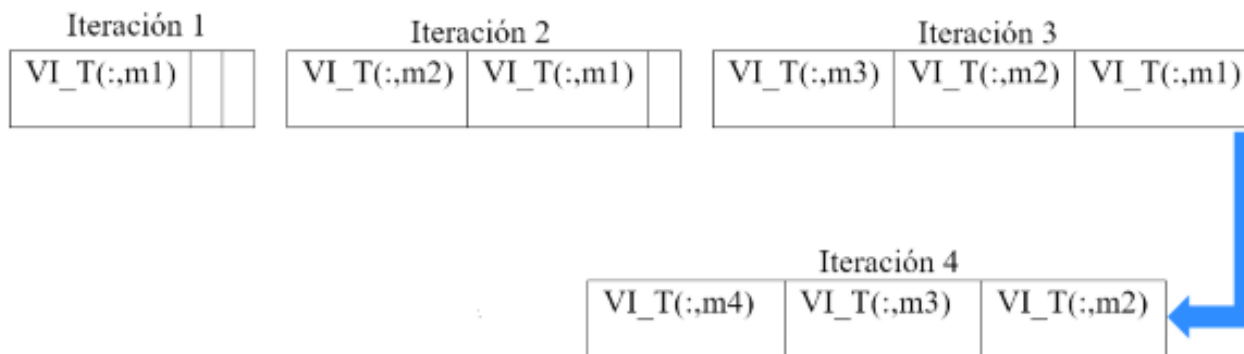


BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

A cada ruta generada se le asocia la distancia que el vector genere, es decir, hay $\binom{m}{n}$ distancias y vectores generados, esas distancias se guardan en un vector denominado vector distancia, asociada a cada ruta generada, eligiendo, en primer caso, la posición donde esté la menor distancia y dado se asocia a la matriz de rutas generadas, se obtiene así la nueva ruta inicial y la ruta anterior se guarda en la lista tabú como se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Lista Tabú



Nota. Sánchez, L. (2020). Lista Tabú [Figura]. Recuperado de: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2020/178767.pdf>

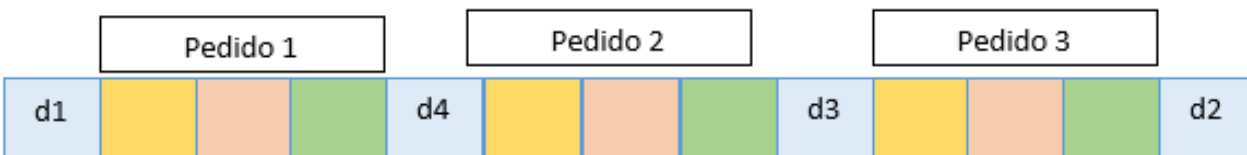
7.8.1 Representación de la Solución

Para un ejemplo en específico donde se deben realizar tres pedidos, cada uno con tres artículos a recoger en las posiciones de almacenamiento, se obtendría un vector de la siguiente dimensión,

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 31

Vector de posiciones de Almacenamiento.



El vector se representa por tres órdenes de pedido, la primera orden de pedido empieza en un depósito, luego se muestran las posiciones de almacenamiento donde debe dirigirse para recoger cada artículo y cuando finaliza su recorrido, se dirige al depósito que se encuentra más cercano y en ese depósito empezara la ruta para el siguiente pedido. De esta forma sucesivamente hasta completar las tres órdenes de pedido.

7.8.2 Representación del Vecindario

Luego, para el ejemplo del pedido 1 en particular, el selector debe partir de un depósito y recoger artículos en tres posiciones de almacenamiento, para luego dejar el pedido en otro depósito.

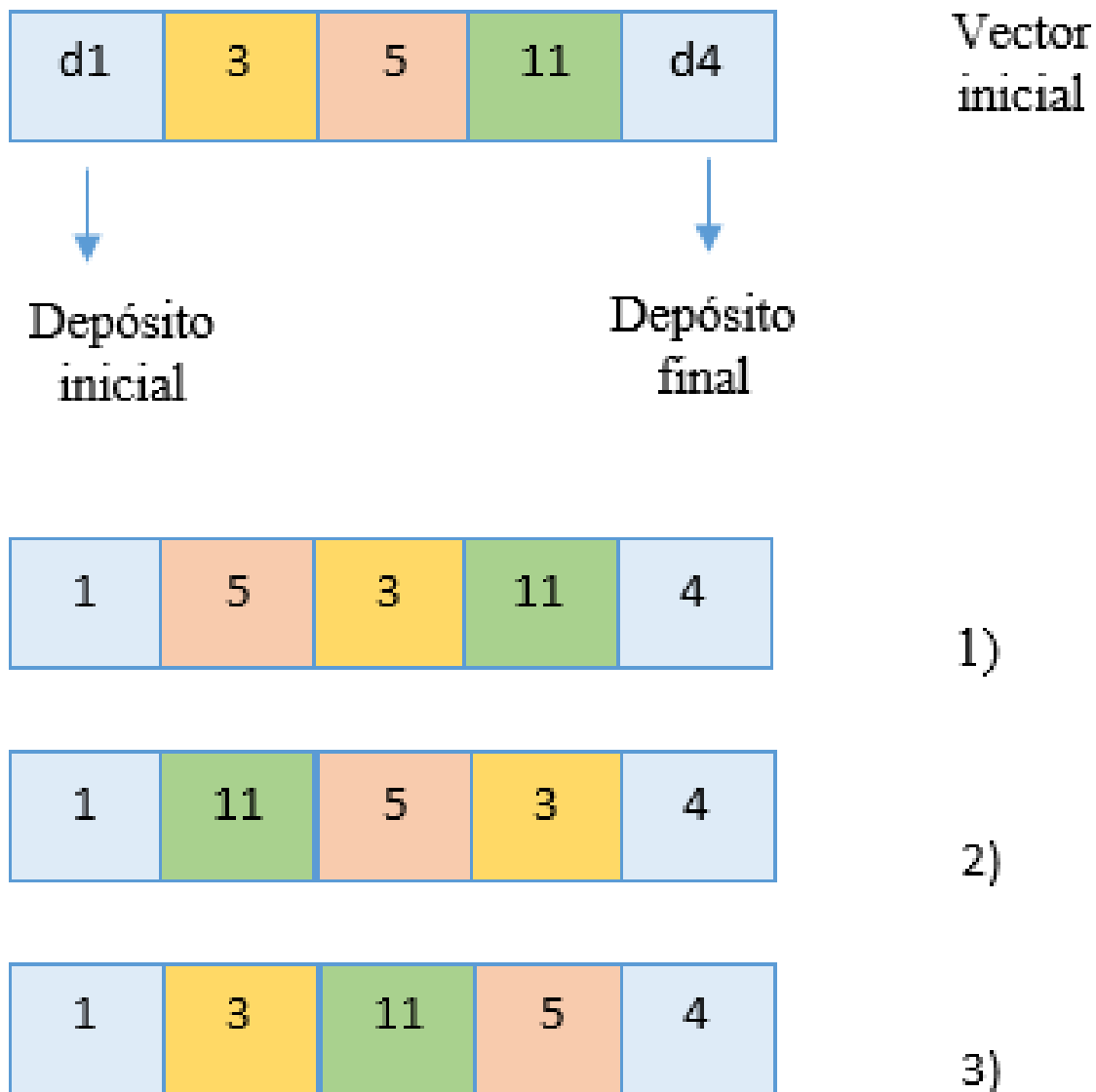
Se tiene,

$$\binom{3}{2} = \frac{3!}{2!(3-2)!} = \frac{3 \times 2 \times 1}{2! \times 1!} = 3$$

Por tanto, se tiene el siguiente vecindario:

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 32

Representación de la solución

Entre todos los posibles vectores resultantes de esta iteración, se elige el mejor y se guarda en la lista Tabú, esta lista evita que se vuelva a elegir la misma solución dependiendo del número Tabú que se haya asignado.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 33*Búsqueda Tabú.*

<i>Algoritmo: Búsqueda Tabú</i>
<i>Entrada: Deposito_Inicial, Producto_Optimizar, A, Producto, Mat_Deposito, Posicion, Elem_Almacenado, Mat_Distancia. Salida: RUTA y CostoFinal.</i>
<p>Etapa 1. Se obtiene la ruta inicial;</p> <p>Etapa 2. Repetir hasta $\binom{m}{n}$ obteniendo las rutas (Matriz_Ruta) y el vector distancia (Dis_Matriz_Ruta) (p)</p> <p>{</p> <p>Etapa 3. [Filas_LT,Columnas_LT]=size(Lista_Tabu);</p> <p>Etapa 4. Repetir hasta Filas_LT (q)</p> <p>{</p> <p>Etapa 5. Diferencia_Ruta_LT=Matriz_Ruta(p,:)-Lista_Tabu(q,:);</p> <p>Etapa 6. si Diferencia_Ruta_LT==zeros(1,length(Ruta_Inicial))</p> <p>{</p> <p>Etapa 7. Dis_Matriz_Ruta(p)=5*A;</p> <p>}</p> <p>Etapa 8. Termina condicional</p> <p>Etapa 9. Termina ciclo de Repetir hasta Filas_LT</p> <p>Etapa 10. Termina ciclo de Repetir hasta $\binom{m}{n}$</p> <p>Etapa 11. [Valor_Minimo,Posicion_Valor_Minimo]=min(Dis_Matriz_Ruta);</p> <p>Etapa 12. Matriz_Ruta=Matriz_Ruta(Posicion_Valor_Minimo,:);</p> <p>Etapa 13. Matriz_Optimos=[Matriz_Optimos;Matriz_Ruta];</p> <p>Etapa 14. Grafica_Distancia=[Grafica_Distancia,Valor_Minimo];</p> <p>Etapa 15. Lista_Tabu=[Lista_Tabu;Matriz_Ruta];</p> <p>Etapa 16. [Filas_LT,Columnas_LT]=size(Lista_Tabu);</p> <p>Etapa 17. si Filas_LT>Numero_Tabu</p> <p>{</p> <p>Etapa 18. Lista_Tabu=Lista_Tabu(end-(Numero_Tabu):end,:);</p> <p>}</p> <p>Etapa 19. [Distancia_Final,s_3]=min(Grafica_Distancia);</p> <p>Etapa 20. Ruta_Final=Matriz_Optimos(s_3,:);</p> <p>Etapa 21. fprintf('La mejor ruta es: \n')</p> <p>Etapa 22. Ruta_Final</p> <p>Etapa 23. fprintf('La distancia asociado es: \n')</p> <p>Etapa 24. Distancia_Final</p> <p>Etapa 25. plot(Grafica_Distancia)</p>

8. Validación del algoritmo

Para hacer el análisis del comportamiento del algoritmo Tabú en términos de tiempo computacional en el problema de Enrutamiento de un Recolector (SPRP) en un Almacén de Comercio Electrónico con Almacenamiento Disperso y Múltiples Depósitos se realizó un diseño de experimentos 2^k . El algoritmo se desarrolló en Matlab ® versión 2020 y el diseño factorial se

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

realizó en el software estadístico minitab versión 2019. La instancia utilizada para el conjunto de pequeños datos fue la propuesta por Weidinger, Boysen, & Schneider (2019), con longitud de pasillos 5, cantidad de pasillos 2, número de depósitos 4, cantidad de SKU de 9 y 3 número de órdenes. Para el conjunto de medianos datos la instancia utilizada fue de longitud de pasillo 80, cantidad de pasillos 20, numero de depósitos 15, cantidad de SKU de 500 y 5 número de órdenes. La instancia utilizada para el conjunto de grandes datos fue la propuesta por Weidinger, Boysen, & Schneider (2019), con longitud de pasillos 150, cantidad de pasillos 40, número de depósitos 26, cantidad de SKU de 2000 y 10 número de órdenes.

El diseño experimental es 2^2 , con 5 réplicas; los factores son A (número tabú) y B (número de iteraciones). El nivel bajo de A es de 3 y el nivel alto es de 4, para B el nivel bajo es de 100 y el alto es de 300. En este capítulo se va a analizar qué factor (A, B O AB) incide mayormente en la distancia. Para esto se tienen en cuenta cinco réplicas como lo muestra la tabla 11 para las pequeñas instancias, la tabla 12 para las medianas instancias y la tabla 13 para las grandes instancias.

Tabla 11

Experimentos para el análisis factorial $2k$ en pequeñas instancias

A	B	Distancia 1	Distancia 2	Distancia 3	Distancia 4	Distancia 5
3	100	18	22	18	21	22
	300	17	18	15	18	17
4	100	17	20	18	19	19
	300	18	19	14	15	14

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Tabla 12*Experimentos para el análisis factorial 2k en medianas instancias.*

A	B	Distancia 1	Distancia 2	Distancia 3	Distancia 4	Distancia 5
3	100	155	149	164	187	147
	300	122	104	146	104	128
4	100	160	170	141	154	158
	300	146	103	178	112	157

Tabla 13*Experimentos para el análisis factorial 2k en grandes instancias.*

A	B	Distancia 1	Distancia 2	Distancia 3	Distancia 4	Distancia 5
3	100	641	588	572	635	636
	300	603	599	485	602	661
4	100	661	614	502	626	658
	300	652	598	510	606	662

8.1 Análisis de Varianza para Pequeñas Instancias.

A continuación, se presenta el análisis de varianza para la distancia en las instancias propuestas por Weidinger, Boysen, & Schneider (2019).

Tabla 14*Análisis de Varianza*

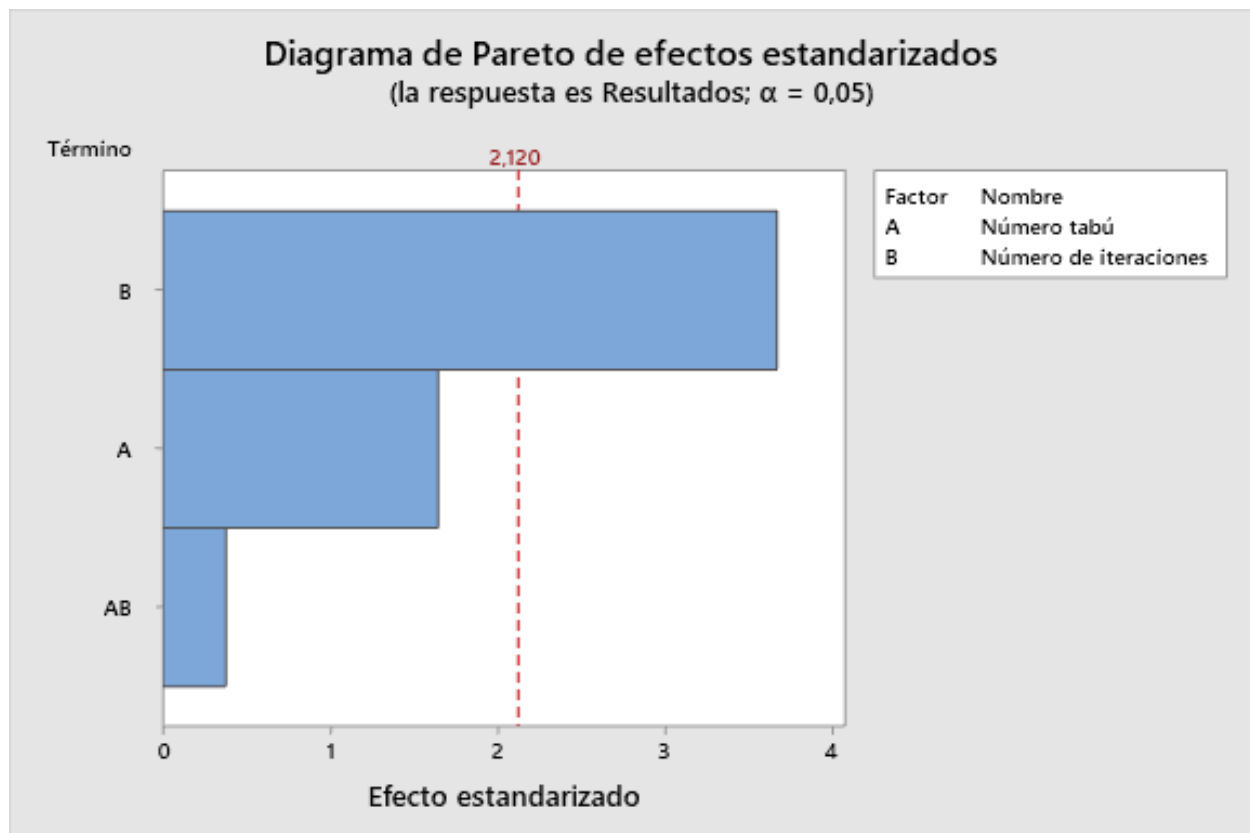
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	50,950	16,9833	5,43	0,009
Lineal	2	50,500	25,2500	8,08	0,004
Número tabú	1	8,450	8,4500	2,70	0,120
Número de iteraciones	1	42,050	42,0500	13,46	0,002
Interacciones de 2 términos	1	0,450	0,4500	0,14	0,709
Número tabú*Número de iteraciones	1	0,450	0,4500	0,14	0,709
Error	16	50,000	3,1250		
Total	19	100,950			

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Los resultados obtenidos para el análisis de varianza permiten evidenciar que el factor número tabú no es significativo en la distancia, ya que, su valor p es mayor a el valor de significancia utilizado que corresponde a 0,05 puesto que el nivel de confianza para este análisis fue de 95%, mientras que el factor número de iteraciones sí resulta ser significativo, dado que, su valor p es menor al valor de significancia de referencia, por tanto, tiene efecto en el valor de la distancia. La interacción de número tabú y número de iteraciones tiene un valor de significancia mayor a 0,05, por lo que se puede afirmar que no hay efecto en la interacción de los dos factores en la distancia. Es decir, para el análisis de varianza de las pequeñas instancias se tiene que el único factor significativo es el número de iteraciones.

Figura 34

Gráfica de Pareto

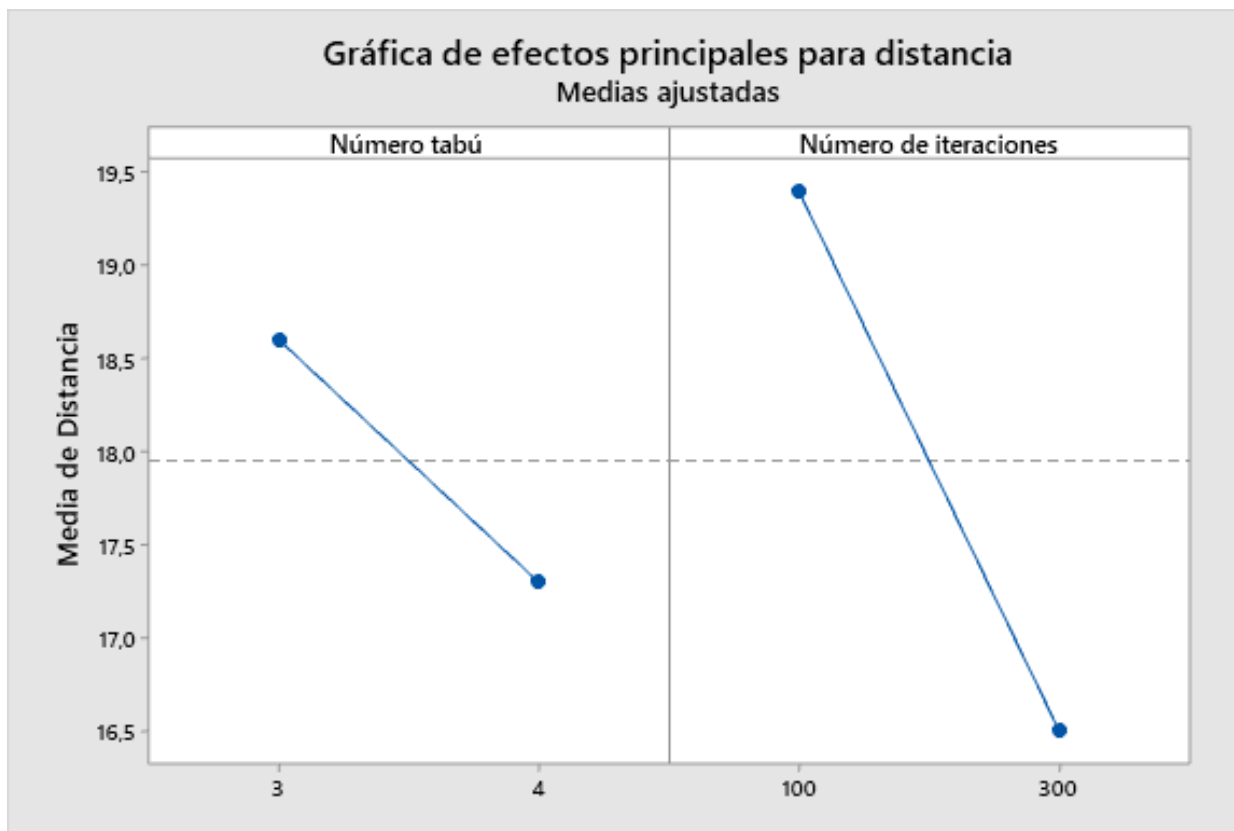


BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

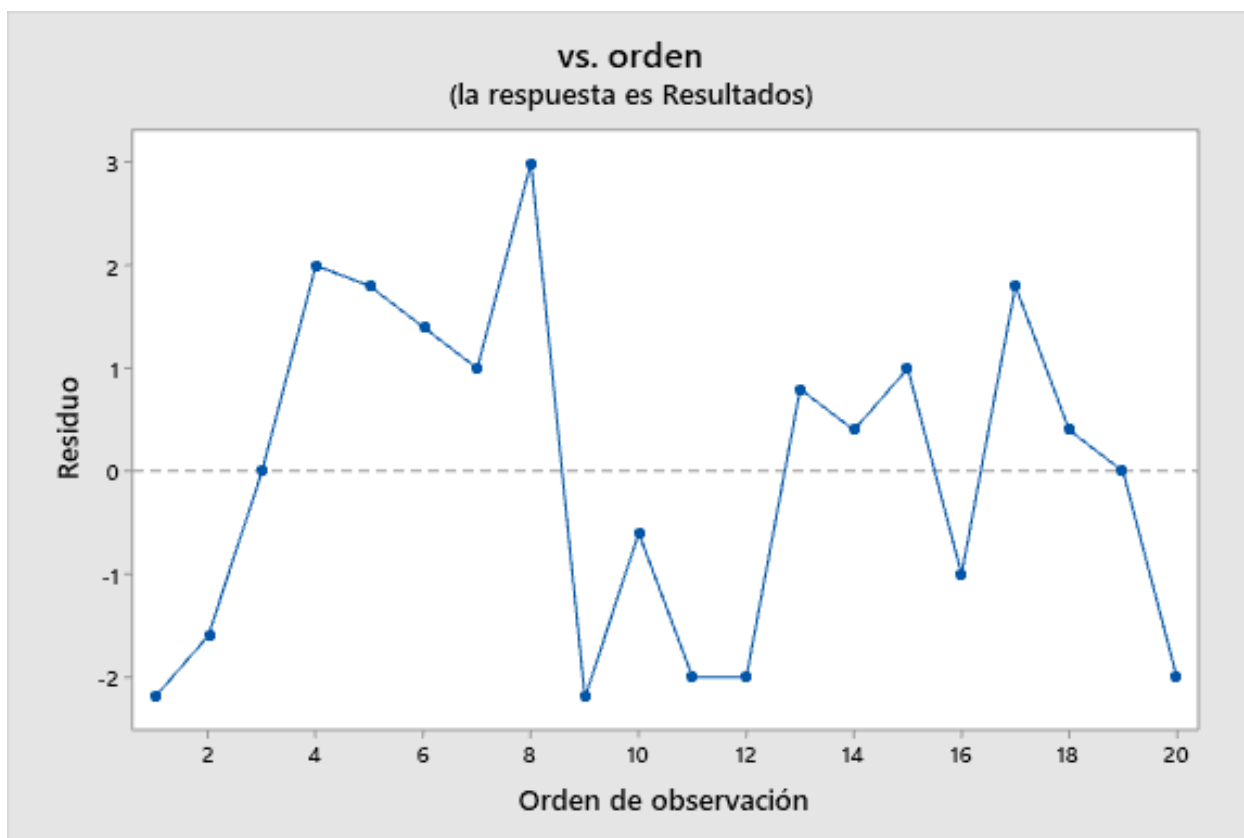
En el diagrama de Pareto se observa que el único factor que tiene incidencia en la distancia es el número de iteraciones, siendo bastante fuerte dicho efecto; también se evidencia que el factor de número tabú y la interacción número tabú y número de iteraciones no tienen efecto en la distancia.

Figura 35

Gráfica de efectos principales para tiempo de cómputo.



Según la gráfica de efectos principales presentada en la figura 35, se analiza que el efecto del número de iteraciones y número tabú presentan una relación negativa frente a sus niveles bajos y niveles altos, esto se debe a que cuando se pasa de un nivel bajo a un nivel alto se puede apreciar una disminución en la media de distancia; se observa que los dos factores tienen un efecto negativo sobre la distancia.

Figura 36*Gráfico residuo vs orden*

En la Figura 36, se observa que no existe un patrón definido en los puntos y se encuentran distribuidos alrededor de la línea central, por lo que se puede concluir que los residuos del diseño son independientes entre sí.

8.2 Análisis de Varianza para Medianas Instancias

A continuación, se presenta el análisis de varianza para la distancia en las medianas instancias.

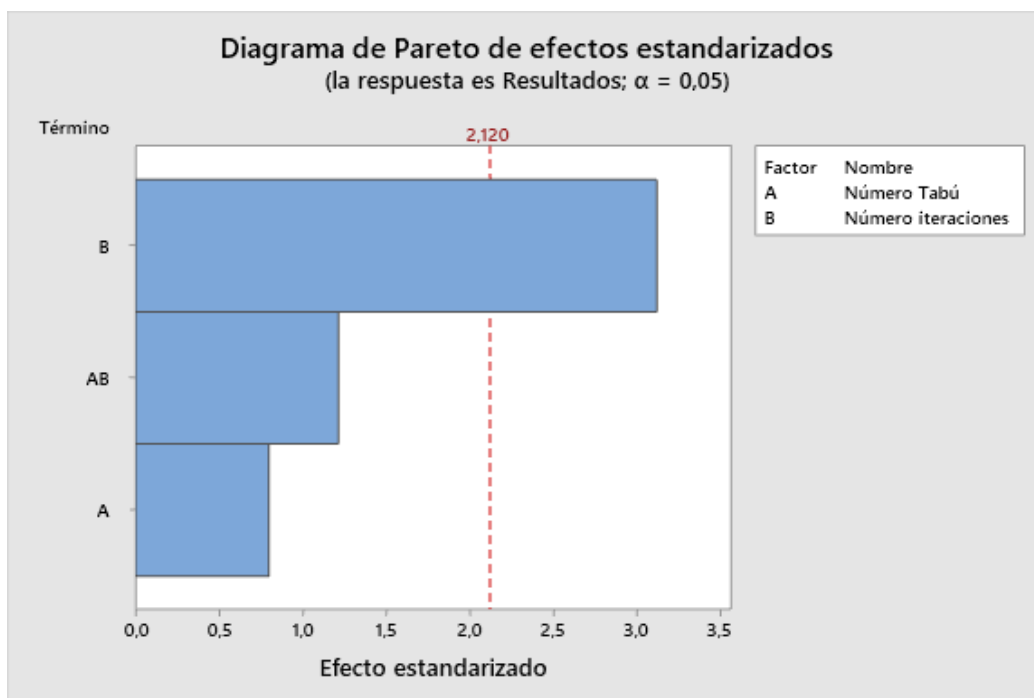
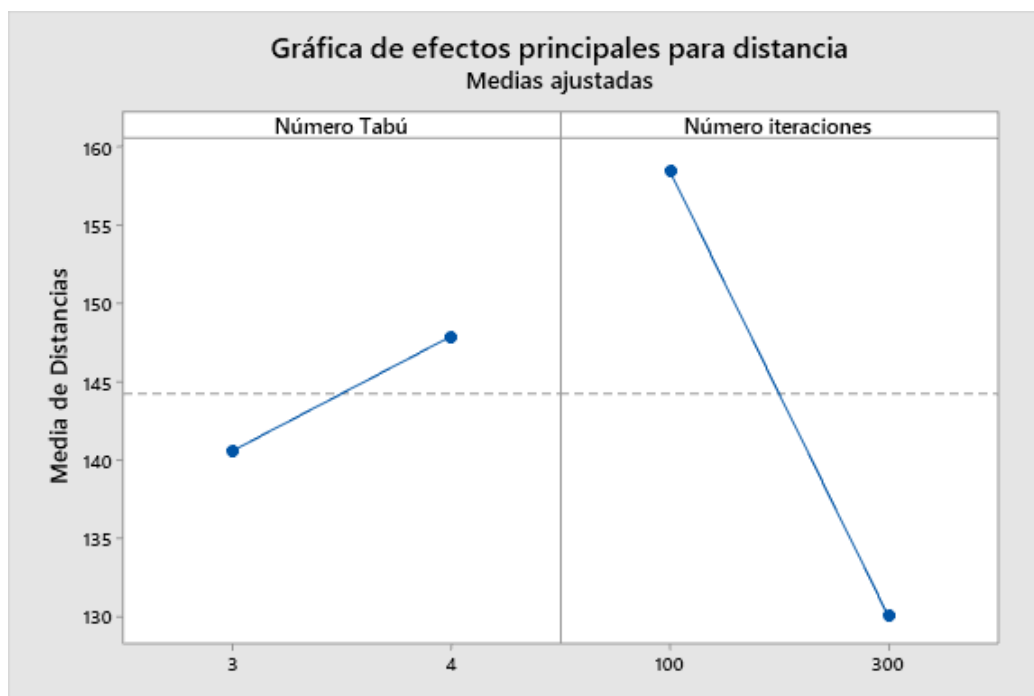
BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Tabla 15. *Análisis de Varianza.*

Fuente	GL	SC	MC	Valor	Valor
		Ajust.	Ajust.	F	p
Modelo	3	4943,8	1647,9	3,95	0,028
Lineal	2	4327,7	2163,9	5,19	0,018
Número Tabú	1	266,4	266,4	0,64	0,436
Número iteraciones	1	4061,3	4061,3	9,74	0,007
Interacciones de 2 términos	1	616,0	616,0	1,48	0,242
Número Tabú*Número iteraciones	1	616,0	616,0	1,48	0,242
Error	16	6674,0	417,1		
Total	19	11617,8			

En el análisis de varianza para las medianas instancias se puede observar que el factor número de iteraciones es significativo, ya que, su valor p es menor al valor de significancia 0,05; caso contrario al factor número tabú que tiene un p valor mayor, por lo que se considera que no es significativo en la variable respuesta distancia. Por otro lado, la interacción de número tabú y número de iteraciones tiene un valor de significancia mayor a 0,05, por lo que se puede afirmar que no hay efecto en la interacción de los dos factores sobre la distancia. Es decir, para el análisis de varianza de las medianas instancias se tiene que el factor número de iteraciones tiene significancia sobre la distancia para el modelo propuesto.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 37*Gráfico de Pareto.***Figura 38***Gráfico de efectos principales para tiempo de cómputo.*

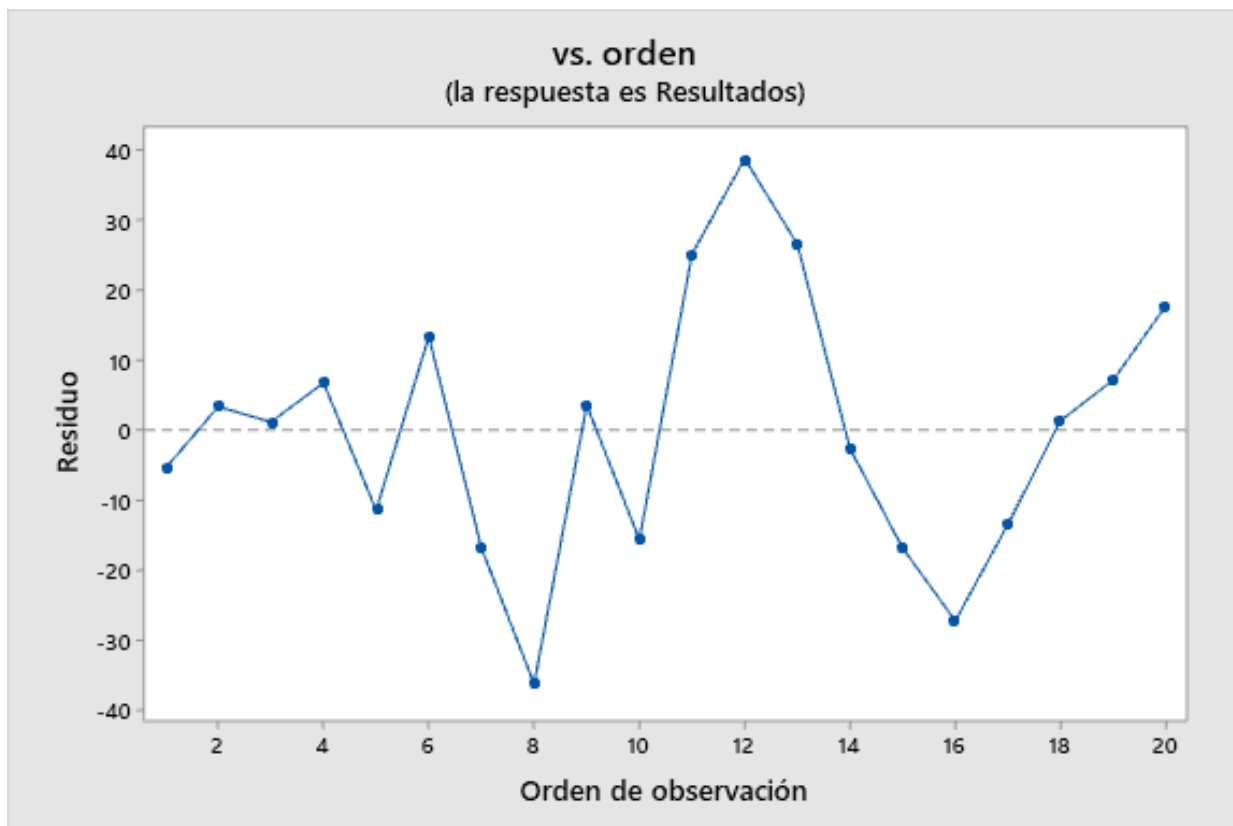
BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

En el diagrama de Pareto se observa que el número de iteraciones tiene incidencia en los valores de la distancia. Cabe resaltar que este es el único factor que presenta significancia en el modelo. También se puede apreciar que tanto el factor número tabú y su interacción con el número de iteraciones no tienen efecto en la distancia.

Según la gráfica de efectos principales presentada en la **Figura 38**, se analiza que el efecto del número tabú presenta una relación positiva frente a sus niveles bajos y niveles altos, esto debido a que el nivel alto de número tabú, aumenta la media de distancia. Caso contrario al factor número de iteraciones que presenta una relación negativa frente a sus niveles bajos y niveles altos, ya que cuando se pasa de un nivel bajo como lo es de 100 iteraciones a un nivel alto de 300 iteraciones, la media de distancia disminuye.

Figura 39

Gráfico residuo vs orden.



BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

En la gráfica residuos vs orden se observa un patrón aleatorio alrededor de la línea central, por lo que se comprueba que los residuos no se correlacionan entre sí.

8.3 Análisis de Varianza para Grandes Instancias

A continuación, se presenta el análisis de varianza para la distancia en las instancias propuestas por Weidinger, Boysen, & Schneider (2019) en las grandes instancias.

Tabla 16

Análisis de varianza para el diseño experimental

Fuente	GL	SC	MC Ajust.	Valor F	Valor p
		Ajust.			
Modelo	3	2557,6	852,5	0,26	0,852
Lineal	2	2204,8	1102,4	0,34	0,717
Número Tabú	1	204,8	204,8	0,06	0,805
Número iteraciones	1	2000,0	2000,0	0,62	0,444
Interacciones de 2 términos	1	352,8	352,8	0,11	0,746
Número Tabú*Número iteraciones	1	352,8	352,8	0,11	0,746
Error	16	52031,2	3251,9		
Total	19	54588,8			

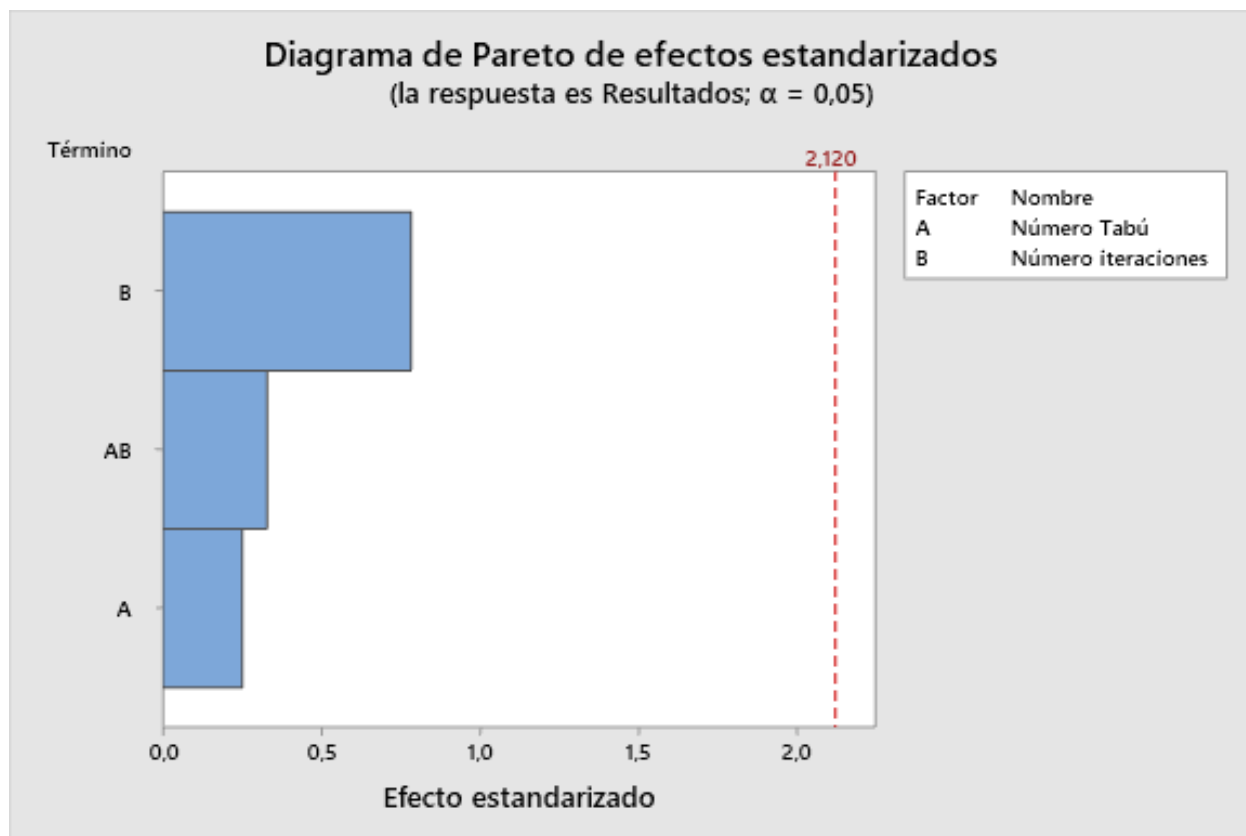
De los resultados obtenidos en el análisis de varianza, se tiene que los factores utilizados, número tabú y número de iteraciones no son significativos, debido a que sus valores p son mayores al valor de significancia utilizado que corresponde a 0,05 puesto que nuestro nivel de confianza para este análisis fue de 95%. Al igual que la interacción entre número tabú y número de iteraciones

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

la cual no es significativa en los resultados de la distancia, ya que su valor p es igual a 0,746 lo cual es mayor a nuestro valor de significancia 0,05.

Figura 40

Gráfica de Pareto

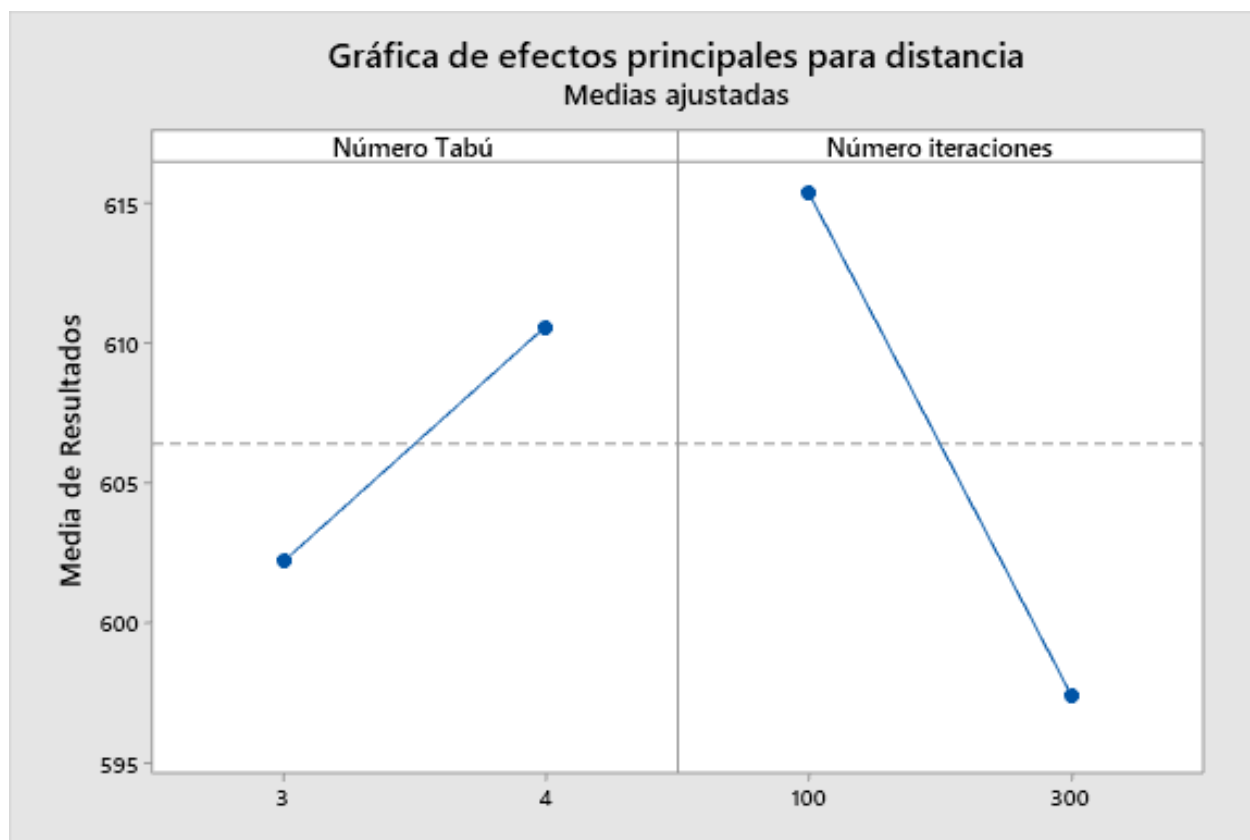


Se identifica con la gráfica de Pareto en la **Figura 40**, que los factores, número tabú y número de iteraciones no son significativos en la distancia, junto con la interacción entre estos. Esto demuestra que a medida que las instancias se van tornando de gran tamaño y al ser los datos aleatorios, no se encuentra significativo ninguno de estos parámetros de entrada para los datos obtenidos.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

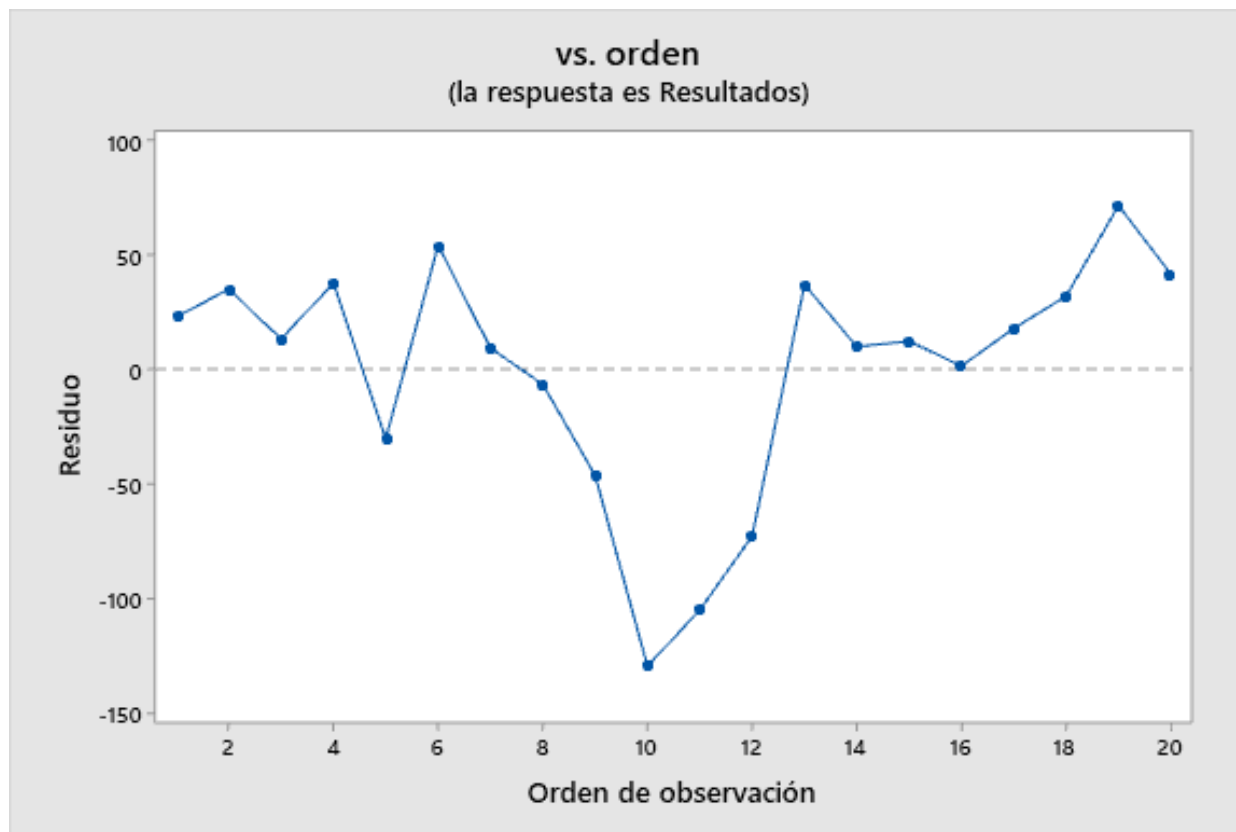
Figura 41

Gráfico de efectos principales para tiempo de cómputo.



Según la gráfica de efectos principales presentada en la Figura 41, al igual que para las instancias de tamaño mediano, se analiza que el efecto del número tabú presenta una relación positiva frente a sus niveles bajos y niveles altos, esto debido a que el nivel alto de número tabú, aumenta la media de distancia. Caso contrario al factor número de iteraciones que presenta una relación negativa frente a sus niveles bajos y niveles altos, ya que cuando se pasa de un nivel bajo como lo es de 100 iteraciones a un nivel alto de 300 iteraciones, la media de distancia disminuye.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Figura 42*Gráfico residuo vs orden.*

En la Figura 42 se observa la gráfica residuos vs orden, la cual se utiliza para comprobar que los residuos sean independientes entre sí, a través del análisis de tendencia, si se presentan patrones en los puntos es indicativo de dependencia. En la gráfica se observa un patrón aleatorio alrededor de la línea central, por lo que se comprueba que los residuos no se correlacionan entre sí.

De acuerdo con todos los datos obtenidos mediante el análisis de varianza para pequeñas instancias y grandes instancias se procede a realizar un análisis global; teniendo en cuenta todos los análisis obtenidos para cada tamaño de instancia, se puede concluir que para las instancias pequeñas el número de iteraciones resulta ser significativo a diferencia del número tabú, a medida que el tamaño de las instancias se va volviendo mayor dichos factores pasan a ser no significativos

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

en los resultados de la distancia. Pero cabe aclarar que cuando se realizan los análisis para instancias de tamaños muy grandes, se puede presenciar que tanto el número de iteraciones como el número tabú no son significativos en el modelo, al igual que la interacción entre estos, lo que nos indica que dichos factores no inciden sobre la distancia recorrida por el selector en el almacén.

9. Resultados

Para la obtención de los resultados se correrá el programa en un computador con las siguientes especificaciones, Intel-Core i7, sistema operativo de 64 bits, procesador x64, memoria RAM de 8GB y memoria interna de 135 GB. En la Tabla 17, se muestra las referencias que contienen los paquetes de instancias que se utilizaron para obtener los resultados, hay que tener en cuenta que las instancias A, B, C cuentan con parámetros de entrada como lo son, longitud de pasillo igual a 5, cantidad de pasillos igual a 2, y numero de depósitos 4. Para las instancias D, E, F se cuenta con parámetros de entrada como lo son, longitud de pasillo igual a 80, cantidad de pasillos de 20, y numero de depósitos 15. Para las instancias G, H, I se cuenta con parámetros de entrada como lo son, longitud de pasillo igual a 150, cantidad de pasillos de 40, y numero de depósitos 26.

De esta manera se explica que los únicos parámetros de entrada que se alteran para cada corrida son el número de pedido y la cantidad SKU, se realizarán 10 corridas, con 300 iteraciones y se tomarán los mejores resultados para cada instancia junto con el tiempo computacional empleado. El número tabú que se usa es de 3, debido a que cuando se realizó la validación estadística se observó que con este se logra una disminución en la distancia y en los tiempos computacionales.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Tabla 17*Referencias tomadas para cada paquete de instancias*

Paquetes de instancias			
Referencia	Número de pedidos	Cantidad	SKU
A	1	3	
B	3	6	
C	3	9	
D	5	400	
E	5	500	
F	5	550	
G	5	600	
H	10	1000	
I	10	2000	
J	10	3500	
K	10	5000	

9.1 Comparación de Búsqueda Tabú y Método Exacto.

Se presentan los resultados obtenidos con el algoritmo de búsqueda Tabú y el método de solución exacto que fue modelado en el software Gams. Cabe resaltar que los datos tenidos en cuenta para la obtención de los resultados fueron aleatorios, así como también lo realizaron los autores Weidinger,Boysen,Schneider en su artículo “Picker routing in the mixed-shelves warehouses of e-commerce retailers”, 2019. Por esta razón, se opta por desarrollar un metodo exacto y llevar a cabo la comparación para las instancias A, B y C, las cuales cuentan con parámetros de entrada iguales a número de pasillos 2, longitud de pasillos 5, cantidad de depósitos 4. Los resultados se ilustran en la Tabla 18.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Tabla 18

Comparación de resultados entre métodos.

Instancia	Método exacto		Búsqueda Tabú		GAP	GAP tiempo
	Distancia	Tiempo (s)	Distancia	Tiempo (s)	distancia	de cómputo
A	6	1000,618	7	22,881264	16,66666667	-97,71328679
B	10	1000,878	12	23,728637	20	-97,62991723
C	13	1001,27	15	25,03064	15,38461538	-97,50011086

Los métodos exactos son los que permiten obtener una solución óptima de algún problema en específico. La solución óptima se entiende como la mejor de todas las soluciones posibles, por lo tanto, se determina que los métodos exactos brindan mejores opciones para la solución de los problemas. Hay que tener presente que este tipo de métodos son aplicables a instancias de tamaños reducidos, esto se debe a que los tiempos computacionales empleados para solucionar los problemas aumentan significativamente y exponencialmente dependiendo de su dimensión. Es por esto que en la presente investigación se quiere demostrar la distancia que se obtiene y el tiempo computacional empleado obtenido por el método exacto desarrollado en el software GAMS y compararlo con los resultados obtenidos por la metaheurística Búsqueda Tabú. En el GAP distancia, se logra observar cuánto disminuye la distancia obtenida en Tabú respecto al método exacto y en el GAP tiempo computacional se representa el incremento de tiempo empleado por el método exacto respecto a Búsqueda Tabú, esto debido a la complejidad del problema resuelto y las dimensiones de las matrices obtenidas.

Según lo obtenido se observa que como se había mencionado anteriormente, la solución respecto a la distancia es menor con el método exacto, pero al ser un problema de tipo NP Hard y con múltiples variables, se obtienen dichas soluciones con tiempos computacionales excesivamente grandes a comparación de los tiempos obtenidos mediante el algoritmo de

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Búsqueda Tabú, esto también indica que, para instancias de tamaño grande, el tiempo computacional llegaría a ser de un tamaño desmedidamente grande.

En esta investigación se tienen instancias pequeñas, medianas y grandes, como ya se mencionó anteriormente, en la tabla 17 (comparación de resultados entre métodos) se aprecia la comparación entre el método exacto y la metaheurística Tabú para pequeñas instancias, esto debido a que los parámetros de entrada para instancias medianas son longitud de pasillo igual a 80, cantidad de pasillos de 20, y número de depósitos 15; la fórmula para hallar la cantidad de posiciones donde se encuentran los elementos almacenados es $\text{Posiciones de almacenamiento} = \text{cantidad de pasillos} * \text{longitud de pasillos} * \text{número de estantes por pasillo}$, es decir, la cantidad de posiciones de almacenamiento es de 3200 y la matriz distancia resulta ser de $3215 * 3215$ ya que dicha matriz tiene contemplada distancias entre depósitos y posiciones de almacenamiento a lo largo de todo el almacén, teniendo en cuenta también el número de depósitos en el almacén. Por su parte, para las grandes instancias tenemos parámetros de entrada de longitud de pasillo igual a 150, cantidad de pasillos de 40, y número de depósitos 26, por lo que la cantidad de posiciones de almacenamiento serían 12000 y la matriz distancia sería de $12040 * 12040$. Teniendo en cuenta estos volúmenes de datos y los tiempos computacionales obtenidos al analizar las pequeñas instancias, conociendo el % de aumento de distancia para tabú oscila en 15,38461538 y 20 y el % de disminución de tiempo para Tabú oscila entre 97,50011086 y 97,71328679, resulta muy complejo ingresar al solucionador Gams dichas matrices, además, en Weidinger, Boysen, & Schneider, (2019) los resultados para el conjunto de grandes instancias en el solucionador estándar Gurobi, que fue el implementado en dicha investigación no pudo encontrar soluciones factibles. Con esto queda demostrado la utilidad e importancia del algoritmo propuesto en esta investigación, ya que arroja soluciones factibles en tiempos computacionales razonables.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

A continuación, se presentan los problemas obtenidos organizados por pequeñas instancias, medianas instancias y grandes instancias.

Tabla 19

Paquete de problemas instancia A.

Búsqueda Tabú		
	distancia	tiempo computo
A	9	50,747989
	9	31,321473
	9	71,447521
	9	14,840065
	9	57,606578
	7	47,056681
	9	31,893662
	7	22,881264
	8	32,04221
	9	19,465123

Tabla 20

Paquete de problemas instancia B.

Búsqueda Tabú		
	distancia	tiempo computo
B	14	24,323226
	12	39,357333
	12	23,721637
	12	28,381611
	13	25,50169
	12	24,598852
	13	25,651515
	13	26,515851
	12	29,515126
	14	37,825314

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Tabla 21*Paquete de problemas instancia C.*

Búsqueda Tabú	
distancia	tiempo computo
15	25,03064
19	21,275028
17	43,229764
18	28,758716
18	35,890899
C	
17	28,118205
16	37,125154
19	30,765542
17	29,945156
15	28,451582

Se evidencia en la Tabla 19, en la

Tabla 20 y en la Tabla 21 que para cada instancia se generaron 10 problemas diferentes, obteniendo de esta forma, 30 problemas para las pequeñas instancias, entre los que se destacan para 3 pedidos y 3 SKU una distancia de 7 y un tiempo computacional de 22,881264, para la instancia de 3 pedidos y 6 SKU se tiene que la menor distancia obtenida es de 12 con un tiempo computacional de 23,721637 y para 3 pedidos y 9 SKU se tiene una distancia de 15 con un tiempo computacional de 25,030640.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Tabla 22*Paquete de problemas instancia D.*

Búsqueda Tabú		
	distancia	tiempo computo
	130	33,55656
	113	34,90213
	188	33,533265
	114	32,98802
D	169	34,970155
	185	32,900575
	171	32,16566
	110	32,362635
	97	32,21601
	145	33,190045

Tabla 23*Paquete de problemas instancia E.*

Búsqueda Tabú		
	distancia	tiempo computo
	128	36,001905
	154	35,83205
	110	35,65872
	174	36,299675
E	151	35,782695
	148	36,009895
	104	36,524885
	146	34,94857
	111	37,000395
	170	35,982525

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Tabla 24*Paquete de problemas instancia F.*

Búsqueda Tabú		
	distancia	tiempo computo
F	180	38,32081
	170	37,519155
	120	38,04306
	171	38,61274
	110	37,739325
	159	41,889095
	144	36,76981
	174	36,660685
	115	36,31241
	113	38,41828

Tabla 25*Paquete de problemas instancia G.*

Búsqueda Tabú		
	distancia	tiempo computo
G	137	38,278255
	140	38,27609
	176	38,496595
	113	37,340545
	135	39,108095
	122	40,01185
	156	45,156095
	174	38,50098
	151	38,029745
	130	37,87271

Para las medianas instancias se tienen 40 problemas, entre los que se destacan para 5 pedidos y 400 SKU una distancia de 97 y un tiempo computacional de 32,21601, para 5 pedidos y 500 SKU se tiene una distancia de 104 y un tiempo computacional de 36,524885, para 5 pedidos y 550 SKU la distancia es de 110 y tiempo computacional de 37,739325 y para 5 pedidos y 600 SKU la menor distancia es de 122 con un tiempo computacional de 40,01185.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Tabla 26*Paquete de problemas instancia H, I, J, K*

Búsqueda Tabú		
	distancia	tiempo computo
H	559	409,91598
	542	406,64544
	528	406,62475
	510	407,008725
	391	405,396635
	625	407,478405
	661	404,967365
	689	402,64673
	656	404,102305
	531	402,39264
I	603	830,848245
	627	833,83744
	647	826,212985
	583	825,49952
	729	833,430005
	599	828,21342
	668	825,14981
	661	824,824515
	485	829,204945
	589	828,51462
J	612	1347,38057
	597	1392,781755
	631	1398,56624
	812	1386,63549
	714	1361,088275
	667	1362,13806
	628	1346,69374
	612	1342,97265
	599	1340,47069
	817	1344,532105
K	654	1931,76321
	663	1897,244455
	798	1833,047635
	795	1865,721205
	786	1842,83903
	800	1826,7423
	739	1831,265195
	779	1816,89579
	865	1812,55473
	725	1818,84918

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Para las grandes instancias se tiene un total de 40 problemas en los que se destaca para la instancia H una distancia de 391 y un tiempo de cómputo de 405,396635, para la instancia I una distancia de 485 y un tiempo de cómputo de 829,204945, para la instancia J una distancia de 597 y un tiempo de cómputo de 1392,781755 y para K una distancia de 654 y tiempo de cómputo de 1931,76321.

A continuación, en la Tabla 27, se muestran los mejores resultados obtenidos para cada paquete de instancias utilizando la metaheurística de Búsqueda Tabú como método de solución,

Tabla 27

Resultados de las instancias para distancia y tiempo de cómputo.

Instancia	Distancia	Tiempo de cómputo (s)
A	7	22,881264
B	12	23,721637
C	15	25,030640
D	97	32,21601
E	104	36,524885
F	110	37,739325
G	122	40,01185
H	391	405,396635
I	485	829,204945
J	597	1392,78176
K	654	1931,76321

Se aprecia que el algoritmo Búsqueda Tabú propuesto en esta investigación ofrece buenas soluciones, teniendo en cuenta que el problema tratado tiene múltiples depósitos y almacenamiento disperso, por lo que se logró cumplir con lo planteado inicialmente, donde se pretendía proponer un algoritmo de búsqueda Tabú que permitiera obtener buenas soluciones en tiempos computacionales coherentes.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Conclusiones

Según la revisión de literatura se ha encontrado que el tema de almacenamiento es muy amplio y que en él se encuentran diversos tipos de problemas de investigación, tal como lo es el relacionado con el proceso de picking, SPRP también conocido como single picker routing problem; se realizan este tipo de investigaciones ya que este proceso representa un gran porcentaje de las actividades laboriosas que se llevan a cabo dentro de un almacén y que repercuten significativamente en los gastos operativos.

El almacenamiento disperso es una estrategia que ha tomado fuerza en los últimos años, esta ha sido implementada especialmente en el segmento B2C, relacionada con el comercio electrónico, ya que éste presenta tiempos de entrega ajustados, demandas volátiles y pequeños pedidos; esta forma de almacenamiento es adecuada para este segmento, debido a que los pedidos pequeños requieren pocos artículos y el Stock de los estantes mixtos es suficiente, pero cuando se requiere muchos artículos para cumplir con un pedido resulta contraproducente tener estantes mixtos, ya que, si el stock se agota en un estante, el selector va a tener que ir a más visitar más estantes para cumplir la orden, aumentando las distancias y el esfuerzo de la labor de recolección. Al incorporar la estrategia de almacenamiento disperso en un almacén se debe contar con un alto grado de estandarización en el mismo, lo que requiere gran inversión monetaria en cuanto a capacitación del personal y adquisición de la tecnología necesaria para que el selector pueda determinar la ruta mediante un sistema que permita visualizar la ubicación de cada SKU en el almacén.

De acuerdo con los resultados del diseño de experimento aplicado a la metaheurística búsqueda tabú, se encontró que el número de iteraciones es el factor que tiene un mayor impacto

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

sobre la variable respuesta distancia; al obtener los resultados de los análisis para cada tamaño de instancia, se analiza que a medida que estos van aumentando, los factores no presentan un gran impacto sobre la distancia que debe recorrer el selector para completar los pedidos de las ordenes de pedido.

Se observa que por medio del método exacto se llega a la solución óptima, pero hay que tener en cuenta que los tiempos de cómputo son excesivamente grandes. Además, en Weidinger, Boysen, & Schneider, (2019) los resultados para el conjunto de grandes instancias no se pudo encontrar soluciones factibles con el solucionador estándar Gurobi implementado en dicha investigación. Con esto queda demostrado la utilidad e importancia del algoritmo propuesto en esta investigación, ya que arroja soluciones factibles en tiempos computacionales razonables.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Recomendaciones

Para futuras investigaciones se puede considerar abordar este problema con múltiples selectores, como sucede en el mundo real, de modo que se evalúe el impacto de tener selectores trabajando en paralelo, considerando que la labor de picking sería bastante compleja en términos de inventario de artículos en los estantes y alta estandarización que permita conocer en tiempo real la disponibilidad de SKU por lugar de almacenamiento, de modo que si un selector toma un artículo de una posición de almacenamiento y se agotó el stock, el siguiente selector lo sepa de forma inmediata y tome otra ruta de ser necesario.

Se invita a la comunidad científica a hacer uso de otra metaheurística para comparar los resultados obtenidos con la propuesta en esta investigación en términos de distancia y tiempo de cómputo.

Hacer mayor énfasis en la solución de problemas de optimización mediante el uso de heurísticas y metaheurísticas, ya que, normalmente se enfatiza en la solución de este tipo de problemas mediante métodos exactos, y se requiere que se ofrezcan más herramientas para abordar problemas de investigación de operaciones.

Promover el aprendizaje de diversos lenguajes de programación en los estudiantes de ingeniería industrial, ya que, a lo largo de la carrera son pocos los requerimientos que académicos que exigen la adquisición de este conocimiento, el cual es fundamental para el desarrollo de este tipo de trabajos de investigación.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Referencias Bibliográficas

- Alonso, Sergio & Cordon, Oscar & Viana, Iñaki & Herrera, Francisco. (2003). La Metaheurística de Optimización Basada en Colonias de Hormigas: Modelos y Nuevos Enfoques.
- Ardjmand, E. &. (2018). Minimizing order picking makespan with multiple pickers in a wave picking warehouse. *International Journal of Production Economics*.
- CRC Economía Digital. (2019, 16 mayo). Recuperado 21 de diciembre de 2019, de <https://www.crcom.gov.co/es/pagina/economia-digital>
- Daniels, R., Rummel, J., & Schantz, R. (1998). A model for warehouse order picking. *European journal of operational research*, 1-17.
- De Koster, R., & Van der Poort, E. (1998). Routing orderpickers in a warehouse: a comparison between optimal and heuristic solutions. *IIE Transactions*.
- Es.mathworks.com. 2020. *Descripción Del Producto MATLAB- MATLAB & Simulink- Mathworks España.* [online] Available at: <https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html> [Accessed 12 December 2020].
- Es.mathworks.com. 2020. *Descripción Del Producto MATLAB- MATLAB & Simulink- Mathworks España.* [online] Available at: <https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html> [Accessed 12 December 2020].
- Furkan Yener, H. R. (2019). Optimal Warehouse Design: Literature Review and Case Study Application. *Computers & Industrial Engineering*.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

GEO Tutoriales. (13/01/2015). Qué es la Investigación de Operaciones. Descargado de: https://www.gestiondeoperaciones.net/programacion_lineal/que-es-la-investigacion-doperaciones/

Grosse, E. H., Glock, C. H., & Neumann, W. P. (2017). Human factors in order picking: a content analysis of the literature. *International Journal of Production Research*.

Guillen, J.C. (21/06/2013). Investigación de operaciones, qué es, historia y metodología. Descargado de: <https://www.gestiopolis.com/investigacion-de-operaciones-que-es-historia-y-metodologia/>

JIU Rubrico, J. O. (2008). Metaheuristic scheduling of multiple picking agents for warehouse management. *Industrial Robot: An International Journal*.

Ling Liu, K. L. (2017). A capacitated vehicle routing problem with order available time in e-commerce industry. *Engineering optimization*.

Makusee Masae, C. H. (2019). Order picker routing in warehouses: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*.

Makusee Masae, Christoph H. Glock & Panupong Vichitkunakorn (2020). Optimal order picker routing in a conventional warehouse with two blocks and arbitrary starting and ending points of a tour. *International Journal of Production Research*.

Masae, M., Glock, C., & Grosse, E. (2019). Order picker routing in warehouses: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*.

Murray, H.-Y. L. (2019). Robotics in Order Picking: Evaluating Warehouse Layouts for Pick, Place, and Transport Vehicle Routing Systems. *International Journal of Production Research*.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Nils Boysen, F. W. (2019). Warehousing in the e-commerce era: A survey. *European Journal of Operational Research*.

Oudheusden, K. N. (1997). A branch and bound algorithm for the traveling purchaser problem. *European Journal of Operational Research*.

Ramos, Silvia A (1995). Modelos y Optimización I Heurísticas y Problemas Combinatorios. Recuperado de: <http://materias.fi.uba.ar/7114/Docs/ApunteHeuristicas.pdf>

Ratliff, H. a. (1983). Order-Picking in a Rectangular Warehouse: A Solvable Case of the Traveling Salesman Problem. *Operations Research*.

Riojas, A., 2005. Búsqueda Tabú. In: A. Riojas, ed., Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de las N – reinas. [online] Perú. Available at: <https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibVirtualData/monografias/basic/riojas_ca/cap3.pdf>

[Accessed 12 December 2020]. Melián, B., & Glover, F. (2004). Introducción a la Búsqueda Tabú. Recuperado de http://leeds-faculty.colorado.edu/glover/fred%20pubs/329%20-%20Introduccion%20a%20la%20Busqueda%20Tabu%20TS_Spanish%20w%20Belen%2811-9-06%29.pdf

Rios Mercado, Gonzalez Velarde, Roger, Jose Luis (2000). Investigacion de operaciones en accion:Heuristicas para la solución del TSP. Investigacion de operaciones en accion:Heuristicas para la solución del TSP, III(9), 6. Recuperado de: http://eprints.uanl.mx/10030/1/9_Roger_Rios_et_al_Investigacion_de_oper.pdf

Roodbergen, K. J., & De Koster, R. (2001a). Routing order pickers in a warehouse with a middle aisle. *European Journal of Operational Research*.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

Roodbergen, K. J., & De Koster, R. (2001b). Routing methods for warehouses with multiple cross aisles. *International Journal of Production Research*.

Sánchez Rincón, Laura Ximena (2020). Solución al problema de ruteo de vehículos Milk-run con ventanas de tiempo mediante la metaheurística Tabú. (<https://www.boreacr.com/citar-tesis-apa/>Tesis de pregrado.). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Recuperado de: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/https://www.boreacr.com/citar-tesis-apa/tesis/2020/178767.pdf>

Schaeffer, E. (2020). Complejidad computacional de problemas y el análisis y diseño de algoritmos. Universidad Autónoma de Nuevo León México.

Scholz, A., Henn, S., Stuhlmann, M., & Wäscher, G. (2016). A new mathematical programming formulation for the Single-Picker Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 68-84.

Silva Murillo, Roxana (2009). Beneficios del comercio electrónico. *perspectivas*, (24),151-164.

Singh, K., & Oudheusden, D. (1997). A branch and bound algorithm for the traveling purchaser. *European journal of operational research*.

Sörensen, K. (2015). Metaheuristics—the metaphor exposed. *International transactions in operational research*.

Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). Facilities planning. John Wiley & Sons.

Van Gils, T., Ramaekers, K., Caris, A., & de Koster, R. B. (2018). Designing Efficient Order Picking Systems by Combining Planning Problems: State-of-the-art Classification and Review. *European Journal of Operational Research*.

BÚSQUEDA TABÚ PARA PROBLEMA DE ENRUTAMIENTO

- Wäscher, S. H. (2012). Tabu search heuristics for the order batching problem in manual order picking systems. *European Journal of Operational Research*.
- Weidinger, F. (2018). Picker routing in rectangular mixed shelves warehouses. *Computers & Operations Research*, 139-150.
- Weidinger, F., Boysen, N., & Schneider, M. (2019). Picker routing in the mixed-shelves warehouses of e-commerce retailers. *European Journal of Operational Research*.
- Yang, P., Zhao, Z., & Huijie, G. (2020). Optimization of order batch selection in different storage scenarios for e-commerce warehouses. *Transportation research*.
- Zapata Osorio, Osorio Soto, J. E. C. A. (2018). Metaheurística, Búsqueda Tabú; aplicación a problemas de optimización. [Ilustración].
<https://www.studocu.com/co/document/universidad-tecnologica-de-pereira/estructura-de-datos/resumenes/busqueda-tabu-t/6513251/view>
- Žulj, I., Glock, C. H., Grosse, E. H., & Schneider, M. (2018). Picker routing and storage-assignment strategies for precedence-constrained order picking. *Computers & Industrial Engineering*.