

**DISEÑO DE UN MODELO HEURÍSTICO Y SIMULACIÓN DE EVENTOS  
DISCRETOS PARA EL MEJORAMIENTO DE RECOLECCIÓN DE  
PEDIDOS: CASO DE ESTUDIO CENTRO DE DISTRIBUCIÓN EN LA  
CIUDAD DE POPAYÁN DEPARTAMENTO DEL CAUCA**



**JHON ALEXANDER SEGURA DORADO**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA  
FACULTAD DE INGENIRÍA  
INGENIERÍA INDUSTRIAL  
POPAYÁN**

**2021**

**DISEÑO DE UN MODELO HEURÍSTICO Y SIMULACIÓN DE EVENTOS  
DISCRETOS PARA EL MEJORAMIENTO DE RECOLECCIÓN DE  
PEDIDOS: CASO DE ESTUDIO CENTRO DE DISTRIBUCIÓN EN LA  
CIUDAD DE POPAYÁN DEPARTAMENTO DEL CAUCA**

**JHON ALEXANDER SEGURA DORADO**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Industrial**

**Director  
M. Sc. HELMER PAZ OROZCO**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA INDUSTRIAL  
POPAYÁN  
2021**

## **Nota de aceptación**

El director y los Jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación del mismo por sus autores y lo encuentran satisfactorio.

Director

Presidente del Jurado

Jurado

Popayán, 24 de Agosto del 2021

### 3

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios ser mi guía, por darme la sabiduría, entendimiento y fortaleza para continuar en cada momento de la vida y por el padre pio por todas las bendiciones recibidas.

A mi Familia por su esfuerzo y dedicación por el apoyo en la formación como profesional, especialmente a mi esposa Isabel y a mi hija Sara.

También agradezco de manera atenta al M. Sc. Helmer Paz Orozco, como director del presente proyecto de grado, quien con su experiencia, conocimiento y motivación me orientó durante todo el proceso de formación académica e investigativa.

A todos, muchas gracias.

## 4 CONTENIDO

RESUMEN.....	10
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	11
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.....	11
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	12
1.3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	18
2. JUSTIFICACIÓN .....	19
3. OBJETIVOS .....	20
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
4. MARCO REFERENCIAL .....	21
4.1. MARCO TEORICO.....	21
4.1.1. Order picking o preparación de pedidos: según Torres. [3].....	21
4.1.2. Costos logísticos. ....	23
4.1.3. Modelos matemáticos de optimización.....	24
4.1.4. Modelo Heurístico: según R. M. Elbert. [19].....	24
4.1.5. Programación Computacional de los modelos matemáticos:.....	26
4.1.6. Simulación:.....	27
4.2. ESTADO DEL ARTE.....	29
4.3. MARCO LEGAL .....	34
5. DISEÑO METODOLOGÍCO.....	35
6. RESULTADOS.....	38
6.1. Distribución de los productos en el centro de distribución.....	38
6.1.1. Identificación de la estructura del CEDI .....	38
6.1.2. Clasificación ABC.....	43
6.2. Modelo matemático.....	46
6.2.1. Selección del modelo matemático.....	46
6.2.2. Supuestos del modelo.....	46
6.2.3. Formulación matemática del modelo.....	46
6.2.4. Parametrización .....	51
6.2.5. Resultados del modelo matemático en el software GAMS.....	55

## 5

6.3. Metodología para la construcción de un modelo de simulación. ....	65
6.3.1. Construcción del modelo de simulación a partir de los resultados del modelo matemático.....	68

6.3.2. Programación del modelo de simulación.....	68
6.3.3. Descripción de la operación: .....	69
6.3.4. Process Flow:.....	72
6.3.5. Resultados del modelo de simulación generado a partir del modelo matemático. ....	75
6.3.6. Evaluación de tres escenarios de mejora.....	78
Discusión de resultados .....	80
Análisis de los resultados de la tres propuestas .....	81
CONCLUSIONES.....	84
TRABAJO FUTURO .....	86
BIBLIOGRAFÍA .....	87
ANEXOS.....	113

## 6

### LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Unidades vendidas entre 1 septiembre de 2018 a 29 marzo de 2019. ..	12
<b>Figura 2.</b> Repartición de costos de personal.....	13
<b>Figura 3.</b> Distribución del tiempo de las personas en la preparación de pedidos..	13
<b>Figura 4.</b> Los costos logísticos como proporción del PIB.....	14
<b>Figura 5.</b> Distribución de las empresas por tamaño para cada actividad	

económica.....	15
<b>Figura 6.</b> Composición sectorial del Producto Interno Bruto del departamento del Cauca del año 2019.....	17
<b>Figura 7.</b> Índice de logística regional.....	18
<b>Figura 8.</b> Fases de los costos logísticos.....	23
<b>Figura 9.</b> Política transversal en forma de S. ....	25
<b>Figura 10.</b> Picking con retorno. ....	26
<b>Figura 11.</b> Picking del punto medio.....	26
<b>Figura 12.</b> Desarrollo metodológico .....	36
<b>Figura 13.</b> Dimensión de la estantería liviana. ....	38
<b>Figura 14.</b> Banda transportadora. ....	39
<b>Figura 15.</b> Mesa de alistamiento. ....	39
<b>Figura 16.</b> Zona de almacenamiento y alistamiento de pedidos. ....	41
<b>Figura 17.</b> Layout de zona de picking. ....	42
<b>Figura 18.</b> Diagrama de Pareto.....	44
<b>Figura 19.</b> Clasificación ABC en la bodega de almacenamiento.....	45
<b>Figura 20.</b> Metodología para el diseño del modelo matemático. ....	48
<b>Figura 21.</b> Picking cart.....	51
<b>Figura 22.</b> Estadísticas del modelo. ....	56
<b>Figura 23.</b> Ruta número uno generada por el software GAMS en el plano de la bodega de almacenamiento.....	57
<b>Figura 24.</b> Ruta número dos generada por el software GAMS en el plano de la bodega de almacenamiento.....	58
<b>Figura 25.</b> Ruta número tres generada por el software GAMS en el plano de la bodega de almacenamiento.....	59
<b>Figura 26.</b> Ruta número cuatro generada por el software GAMS en el plano de la bodega de almacenamiento.....	60
<b>Figura 27.</b> Política transversal en forma de S. ....	62
<b>Figura 28.</b> Picking Con Retorno. ....	62
<b>Figura 29.</b> Caracterización del problema.....	64
<b>Figura 30.</b> Metodología para la construcción de un modelo de simulación. ....	67
<b>Figura 31.</b> Flujo del proceso de picking.....	71
<b>Figura 32.</b> Flujo de procesos para la ubicación y etiquetado de las unidades en los racks del almacén. ....	73
<b>Figura 33.</b> Flujograma para la generación y recolección de pedidos basados en los datos históricos.....	74

**7**

<b>Figura 34.</b> Mapa del problema para la modelación con simulación.....	75
<b>Figura 35.</b> Modelo de simulación generado a partir del modelo matemático. ....	76
<b>Figura 36.</b> Resultados del modelo de simulación de la distribución a partir del modelo matemático.....	77
<b>Figura 37.</b> Simulación del primer escenario. ....	78
<b>Figura 38.</b> Simulación del segundo escenario.....	79
<b>Figura 39.</b> Simulación del tercer escenario. ....	80
<b>Figura 40.</b> Puntuación total de los escenarios.....	82

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Índice de calidad en logística por actividad económica. ....	16
<b>Tabla 2</b> Fases y tiempos en picking .....	23
<b>Tabla 3</b> Modelo Heurístico.....	24
<b>Tabla 4.</b> Cálculo área total de trabajo.....	40
<b>Tabla 5.</b> Resumen clasificación ABC.....	44
<b>Tabla 6.</b> Demanda de los SKU. ....	52
<b>Tabla 7.</b> Cantidad de artículos almacenados.....	54
<b>Tabla 8.</b> Ruta número uno generada por el software GAMS. ....	57
<b>Tabla 9.</b> Ruta número dos generada por el software GAMS .....	58
<b>Tabla 10.</b> Ruta número tres generada por el software GAMS .....	59
<b>Tabla 11.</b> Ruta número cuatro generada por el software GAMS.....	60
<b>Tabla 12.</b> Eficiencia de la capacidad de carga del picking car utilizado. ....	61
<b>Tabla 13.</b> Descripción de los elementos utilizados del software Flexsim. ....	68
<b>Tabla 14.</b> Comparación de resultados de las tres propuestas para un día de trabajo.....	81
<b>Tabla 15.</b> Resumen de los resultados del escenario óptimo. ....	83

La preparación de pedidos ha sido reconocida como una de las actividades más desafiantes en términos de tiempo, mano de obra y costo para la mayoría almacenes. El cumplimiento del pedido tiene una limitación de tiempo definida por el cliente y cualquier déficit en el proceso de preparación de pedidos a nivel de almacén afectará a toda la Cadena de Suministros.

Este trabajo propone un modelo heurístico que aborda el problema de optimización de las rutas para la preparación de pedidos en un CEDI típico, en una empresa como caso práctico ubicada en el departamento del Cauca, con el fin de minimizar la distancia recorrida. En particular, se propone un enfoque basado en el problema de enrutamiento de vehículos fácil de implementar junto con la matriz de distancia para obtener una ruta óptima para la preparación de pedidos; se resuelve mediante el solver CPLEX del software GAMS y programación entera mixta, se generó 4 rutas óptimas complementarias para recolectar los pedidos demandados determinados, resultando que dos rutas utilizan enrutamiento en forma de S, otra, enrutamiento con retorno, y otra combina ambas políticas, mostrando una reducción de la distancia total de un 5% para completar el proceso de recolección de pedidos. Los resultados obtenidos fueron validados en el software FLEXSIM y se utilizó para evaluar tres escenarios de mejora: i) aumentar la capacidad del picking cart o carritos de picking, ii) aumentar el número de picking carts y iii) aumentar ambos parámetros simultáneamente. La implementación de los softwares FLEXSIM y GAMS no han sido abordados en la literatura para el desarrollo de estos procesos logísticos, es por eso que la integración de éstos permite realizar un proyecto de investigación con un enfoque innovador y encontrar nuevas soluciones.

El mejor resultado muestra que al aumentar la capacidad de los picking carts, se disminuye en un 33%, la distancia total recorrida en un 49,5%, el throughput aumenta un 14%, el tiempo total de picking aumenta un 14%, la ocupación de los recolectores aumenta un 7,4% y la productividad es de 10 cajas por minuto impactando positivamente también a otros indicadores operativos definidos, además para el funcionamiento óptimo del CEDI. Este enfoque combinado innova el abordaje el problema de enrutamiento y la exploración de mejoras.

**Palabras clave:** Recolección de pedidos, Modelo heurístico, Simulación, Flexsim.

## 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Debido a políticas de la empresa el nombre de la compañía e información para la descripción de la empresa no puede ser mencionado. Por el cual nos referiremos a

ella como Mercurius Inc.

Mercurius Inc., es una empresa de venta de artículos electrónico por internet en el mercado retailer<sup>1</sup>, el cual es uno de los sectores comerciales con más crecimiento en los últimos años de la economía en Colombia, y en donde según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en el año 2019 [1], creció el 3,3% respecto al 2018 y además los almacenes de venta minoristas mostraron un crecimiento representativo del 10,9% en sus ventas, ya que el uso de la tecnología aplicada a las ventas genera mayor confianza del usuario por el entorno Ecommerce.

Actualmente Mercurius Inc. tiene un catálogo de ventas de artículos electrónicos, el cual maneja un total de 50 referencias como se puede observar en el anexo 1.

La empresa tubo unos ingresos de USD 43.500 para el año 2018 y USD 47.850 en el 2019, lo que significa que obtuvo un crecimiento del 11%, cabe de aclarar que este periodo de tiempo es utilizado para el estudio de la investigación.

Por otro lado, al realizar un análisis de los datos históricos suministrada por la empresa, podemos concluir que entre el 1 septiembre de 2018 a 29 marzo de 2019, se pudo visualizar que el producto con la referencia 20768, el cual representa la Memoria USB 32 GB reflejó la mayor demanda con un total de 2.587 unidades despachadas y el producto con la referencia 25631 el cual representa el Micrófono inalámbrico con bluetooth tan sólo fueron despachadas 6 unidades como se puede observar en la Figura 1.

<sup>1</sup> El mercado retailer se caracteriza por vender al por menor, es decir comercializar productos en grandes cantidades a diferentes clientes. [55]

## SKU

**Figura 1.** Unidades vendidas entre 1 septiembre de 2018 a 29 marzo de 2019. **Fuente:** Adaptado de Mercurius Inc., 2019. [2]

En el anexo 1 se presentan los datos de las unidades vendidas y el total de referencias que maneja la empresa entre 1 septiembre de 2018 a 29 marzo de 2019 reflejadas en la Figura 1.

### 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cambio de los almacenes a Centros de Distribución (CEDI)<sup>2</sup> ha sido importante para el progreso de las cadenas de abastecimiento<sup>3</sup>. Esto se ha convertido en una estrategia utilizada por las empresas para reducir sus costos logísticos y ofrecer un mejor nivel de servicio; dado que ha permitido disminuir el nivel del inventario, facilitar la recolección de pedidos, almacenamiento y disminuir los costos del proceso. Las empresas en sus CEDI se esfuerzan en aplicar nuevas herramientas como el cross-docking<sup>4</sup> y diferentes tipos de picking para la preparación de pedidos,

que según Torres [3], representa aproximadamente entre el 45 al 75% del costo total de las operaciones de un CEDI como se puede observar en la Figura 2. La

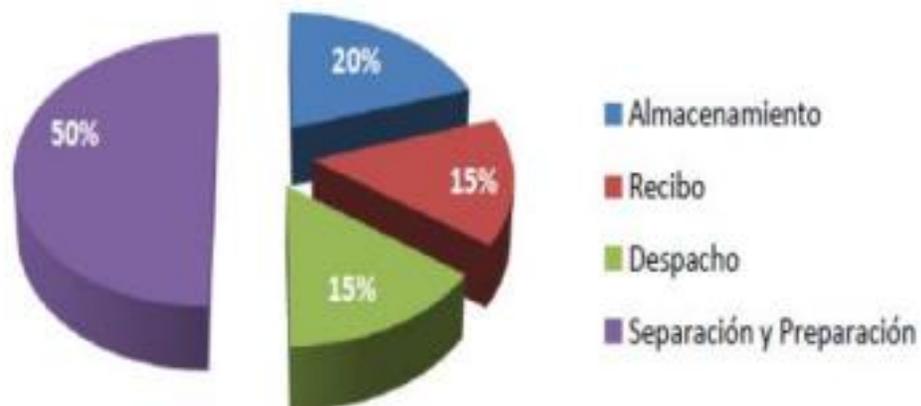
<sup>2</sup> Un CEDI es un espacio logístico en el que se almacena mercancía y se embarcan órdenes de salida para que sean distribuidos en el comercio mayorista o minorista.[56]

<sup>3</sup> Son todas las actividades para preparar y distribuir un bien o producto, con el objetivo de satisfacer una necesidad de un cliente. Los actores que participan en la cadena de abastecimiento son el fabricante, los proveedores, los transportistas, almacenistas, vendedores al detalle y consumidores finales [57]. En otras palabras, es la planeación estratégica y logística de flujo de información, materias primas y dinero.

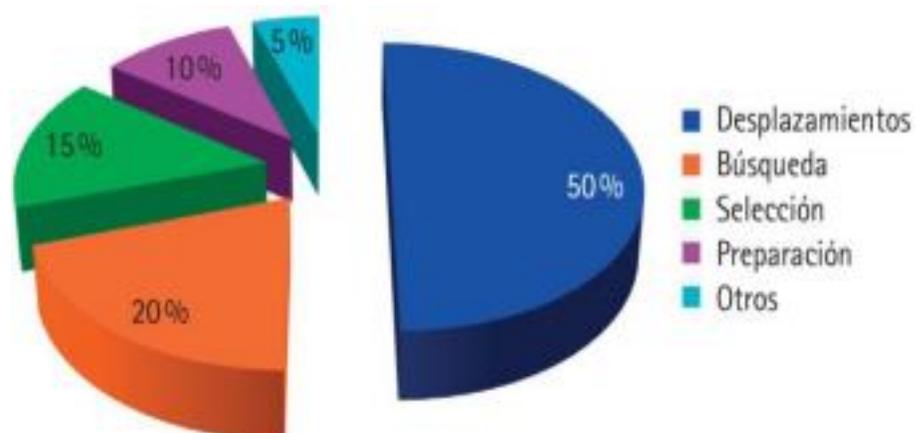
<sup>4</sup> El cross docking consiste en llevar rápidamente un producto descargado desde un transporte de llegada a un vehículo de salida. Todo esto se ejecuta con un tiempo bastante reducido de almacenamiento y manipulación. [58]

12

recolección de pedidos se ha identificado como una operación muy intensiva el cual según Aleisa y Lin [4], puede consumir entre un 50 al 60% de todas las actividades laborales en el almacén como se puede observar en la Figura 3. Por estas razones, se considera la preparación de pedidos la actividad de mayor prioridad para mejorar la productividad.



**Figura 2.** Repartición de costos de personal.  
**Fuente:** Adaptado de Torres Andres, 2013. [5]



**Figura 3.** Distribución del tiempo de las personas en la preparación de

pedidos. **Fuente:** Adaptado de Flamarique Sergi, 2019. [6]

En la actualidad, ofrecer un servicio rápido y de calidad es un requerimiento mínimo para su sostenimiento y competitividad, debido al desarrollo en el ámbito tecnológico mundial, además cada vez las personas están más informadas, por lo tanto, exigen cada vez mayores beneficios.

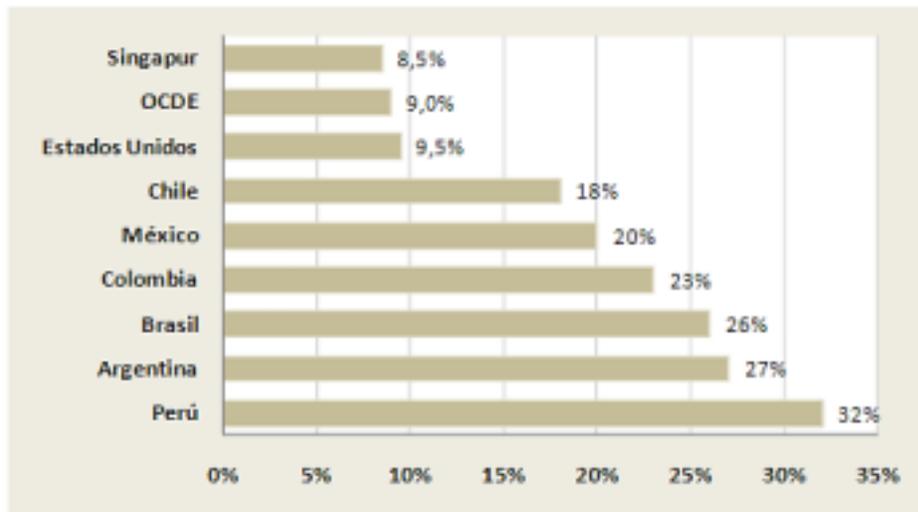
Esto hace que sea necesario tener una gestión adecuada de lo que se produce y poder mantenerlo cerca del cliente en el momento que él lo necesite, así la gestión de almacenes o CEDI representa una parte importante para cumplir las exigencias

13

de los consumidores, es decir una función logística que comprende recepción, almacenamiento, preparación y despacho de pedidos; cuyas decisiones se ven reflejadas en la localización y distribución física de los CEDI, hasta la mejora de los tiempos de alistamiento de las órdenes para la entrega del producto al cliente interno o externo. [7]

Según un estudio realizado por PricewaterhouseCoopers<sup>5</sup> en el año 2016 [8], el comercio retail es el que mayor contribuye en los Estados Unidos; el cual aporta USD 2,6 billones de dólares anualmente al PIB. El porcentaje de ventas minoristas en línea ha mostrado un crecimiento constante, llegando a 7,6% es decir USD 341.000 millones de dólares. El crecimiento minorista en línea ha impulsado no solo el negocio de entrega de paquetes, sino también el negocio de cumplimiento de pedidos donde los productos son recogidos en almacenes o CEDI en gran parte por recolectores humanos. Como resultado, la preparación de pedidos se ha convertido en un punto focal para muchos minoristas. [8]

En las estadísticas realizadas a nivel global, América Latina refleja que los costos logísticos son más altos comparado con regiones pertenecientes a la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), siendo así que en América Latina y el Caribe los costos logísticos admiten entre el 18 al 35% del valor del producto, y representa entre el 16 al 26% del Producto Interno Bruto (PIB), en contraste con los países de la OCDE, donde los costos logísticos relacionados con el producto está en el 8 al 9% con relación al PIB como se puede ver en la Figura 4, estimando la preparación de pedidos, inventarios y despachos de pedidos. [9]



**Figura 4.** Los costos logísticos como proporción del PIB.

**Fuente:** Extraído de Banco Interamericano de Desarrollo, 2007.

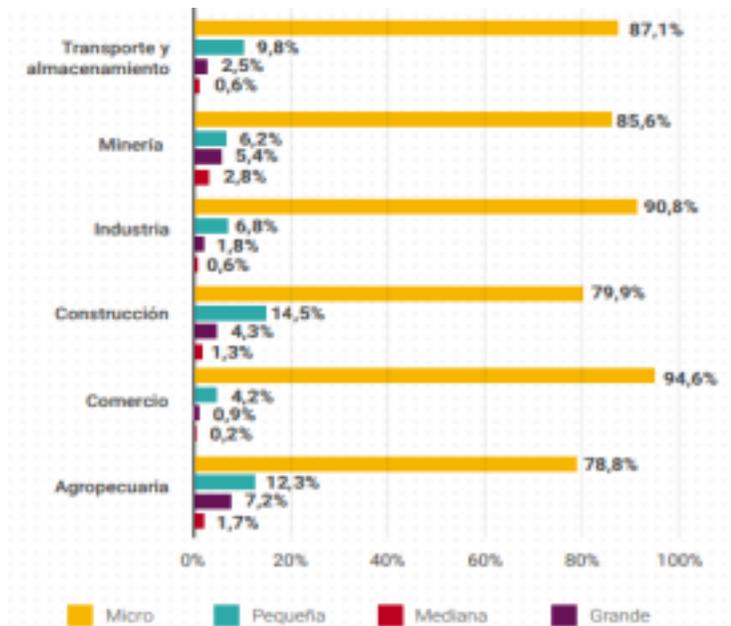
[9]

<sup>5</sup> Es la firma de servicios profesionales más grande del mundo, prestando servicios de auditoría, consultoría y asesoramiento legal y fiscal a las principales compañías, instituciones y gobiernos a nivel global. [59]

14

El servicio de entrega de pedidos a los clientes ha ido incrementando gracias a los acuerdos comerciales que ha firmado Colombia y a su posición geográfica, el país se ha convertido en un centro de alistamiento, distribución y centralización de pedidos a mercados internacionales. Adicionalmente, cuenta con costos competitivos, un mercado interno atractivo, mano de obra calificada y el apoyo del gobierno para una inversión segura y rentable.

Según una encuesta realizada por el Departamento Nacional de Planeación (DPN) en el año 2018 de las 2.738 empresas encuestadas en todo el territorio nacional, el 4% pertenece a la actividad económica de almacenamiento y transporte donde el 2,5% pertenecen a empresas grandes como se puede observar en la Figura 5 [10].



**Figura 5.** Distribución de las empresas por tamaño para cada actividad económica. **Fuente:** Extraído de Castillo Diego, 2013. [10]

Según Castillo [10], se identificó que en Colombia el 75,4 % de los pedidos cumplen los requisitos para considerarse como una entrega perfecta y solo el 21,5 % de las empresas miden el indicador de pedido perfecto, es decir que el pedido debe ser alistado a tiempo, sin daños, completo en cantidad y con la documentación en buen estado. Vale la pena resaltar, por una parte, que las empresas que se desempeñan en las actividades de transporte, almacenamiento y agropecuaria presentan los mayores niveles de servicio y, por otra parte, los pedidos que llegan a tiempo son los de menor proporción a escala nacional como se puede observar en la Tabla 1.

**Tabla 1** Índice de calidad en logística por actividad económica.

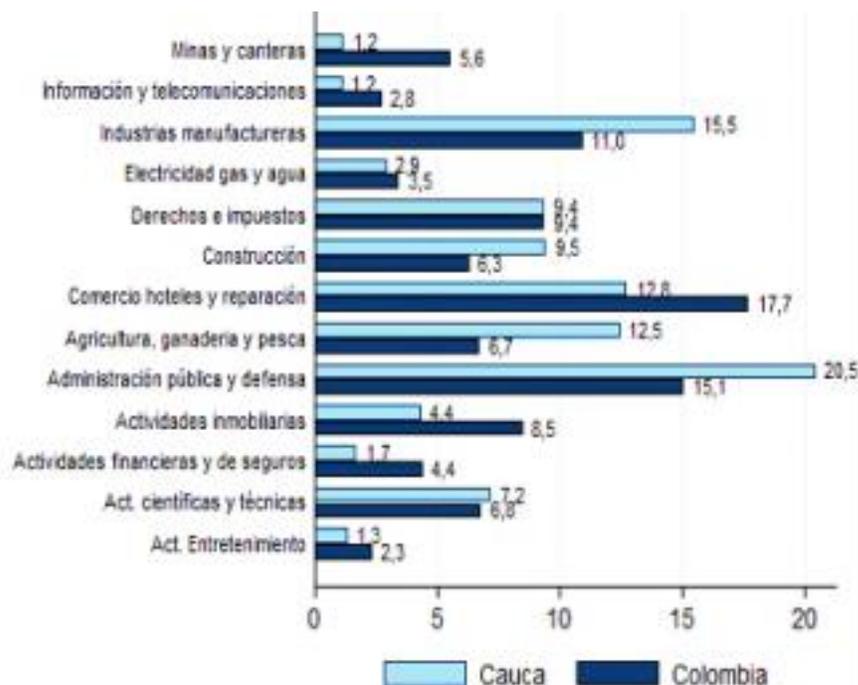
	Nacional	Transporte y almacenamiento	Construcción	Agropecuaria	Comercio
<b>Pedidos sin daños</b>	93.6%	96.4%	96.4%	90.7%	93.5%
<b>Pedidos completos en cantidad</b>	94.7%	97.9%	91.4%	96.9%	94.3%
<b>Pedidos con documentación perfecta</b>	94.1%	96.7%	97%	94.1%	93.9%
<b>Pedidos a tiempo</b>	90.4%	97.5%	88.2%	96.5%	89.7%

<b>Pedido perfecto</b>	<b>75.4%</b>	<b>89%</b>	<b>75.4%</b>	<b>79.8%</b>	<b>74.3%</b>
------------------------	--------------	------------	--------------	--------------	--------------

**Fuente:** Elaborado a partir de Castillo Diego, 2013. [10]

16

El departamento del Cauca, tiene una participación del 1,79% al PIB de Colombia como se puede observar en la Figura 6, el cual se ve reflejado en el desempeño de sectores como el comercio, la industria manufacturera, transporte, la administración pública y defensa, así como las actividades profesionales, científicas y técnicas, beneficiados por un mejor desempeño del consumo privado y público.



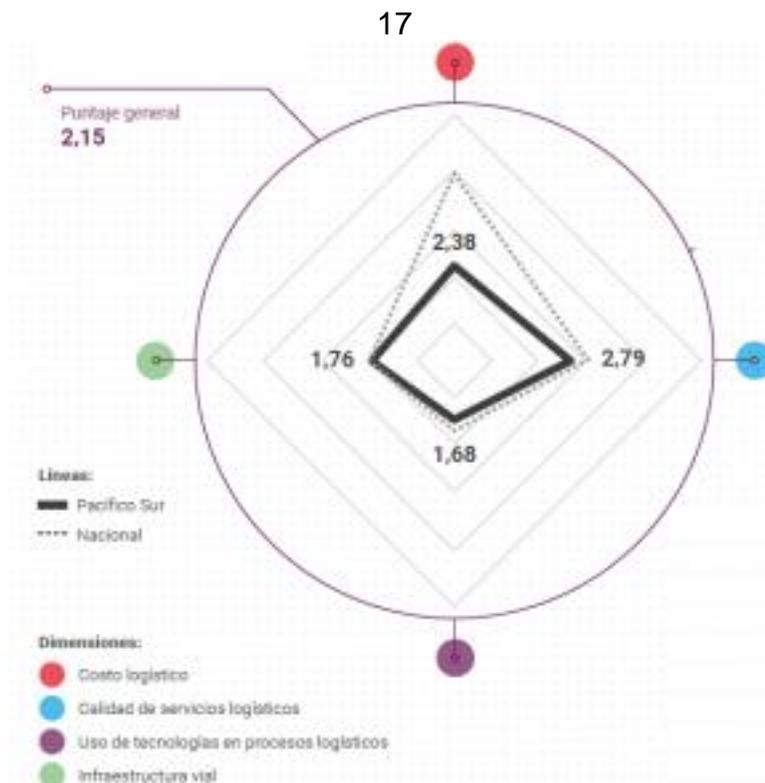
**Figura 6.** Composición sectorial del Producto Interno Bruto del departamento del Cauca del año 2019.

**Fuente:** Extraído de E. Econ, 2020. [11]

La calidad de los servicios logísticos<sup>6</sup> en el departamento del Cauca es el más relevante, el cual toma un valor 2,79 puntos en el Índice de logística regional (ver Figura 7), donde los mejores desempeños están en transporte aéreo, cadena de frío y almacenamiento.

La mayoría de los CEDI de las empresas Caucanas fueron diseñados para manejar unidades de empaque y almacenamiento uniforme, pero no se adecuaron para descomponer las unidades recibidas hacia un empaque de despacho, ni tampoco mejoras en la distancia, tiempo y costos en el proceso de alistamiento de pedidos.

<sup>6</sup> Los servicios logísticos son aquellas actividades que, al tercerizarlas, pueden ser ejecutadas por proveedores externos especializados en logística.[60]



**Figura 7.** Índice de logística regional.

**Fuente:** Extraído de Diego castillo, 2013. [10]

Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo de investigación busca diseñar un modelo heurístico para minimizar la distancia total recorrida para completar el proceso de preparación de pedidos, analizando las operaciones y características actuales del CEDI caso de estudio, tomando como factor clave la distancia para el proceso de alistamiento de órdenes que afecta el tiempo de respuesta y su rendimiento; uno de los aportes de esta investigación es la evaluación del modelo

en el software de simulación Flexsim que permitirá ver la optimización de la productividad, tiempos de alistamiento y operatividad.

### **1.3.PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cómo minimizar el recorrido para la recolección de pedidos a través de la formulación de un modelo matemático heurístico y evaluado mediante simulación de eventos discretos según las características del CEDI?

18

## **2. JUSTIFICACIÓN**

La gestión de los almacenes o CEDI es fundamental para las empresas, ya que son parte de la CS y de la logística, donde hay una oportunidad para buscar la mejora de los rendimientos de las operaciones que ocurren en el almacén con metodologías para cumplir los objetivos de la empresa, pero sin la necesidad de grandes inversiones en tecnologías. Según Koster [12], este tema no ha sido abordado con profundidad, donde concluye que menos del 30% de los artículos son relevantes y que además las implementaciones existentes sólo son aplicables a un tipo general de almacén pasando por alto las condiciones específicas que se puedan dar; esto hace que llevar a cabo un proyecto de investigación de este tipo, sirva para encontrar nuevas soluciones.

La recolección es la actividad prioritaria del proceso de alistamiento de órdenes, que según Torres [3], es la manera más productiva de disminuir los costos entre un 10% hasta un 35%, aumentó las ganancias y optimizó el uso de los recursos dentro del almacén hasta un 70%; dado que actualmente el mejoramiento continuo es una prioridad.

El proyecto se realiza con la necesidad de mejorar el proceso de preparación de pedidos, contribuyendo a la reducción de las distancias recorridas en la recolección de los pedidos que repercute directamente en el tiempo de respuesta del almacén.

La gestión de almacenes hace obligatorios los grandes cambios como la automatización de las actividades del mismo y así obtener resultados positivos, esto la hace fácilmente aplicable a cualquier tipo de almacén, ya que además de generar un mejoramiento de actividades complicadas, crea una cultura de orden que no genera resistencia en la mayoría de los casos; por esto los involucrados en el proceso de alistamiento, y entrega de pedidos son beneficiados importantemente en la disminución de cargas físicas los almacenistas o recolectores.

El desarrollo de este trabajo beneficiara a las empresas del sector productivo porque muestra la forma aplicativa de técnicas académicas en el mejoramiento de recolección de pedidos, debido a que aporta un conocimiento a quien se interese y

tenga acceso a esta información, aunque cada problema a resolver es diferente esta metodología de simulación se acopla a cualquier tipo de problema tanto de desplazamiento, búsqueda, selección y preparación de pedidos. Por otro lado, este proyecto se tiene un acercamiento a una situación real del sector empresarial, que permite poner en práctica los conceptos, herramientas adquiridas en el proceso de aprendizaje y formación como Ingeniero Industrial.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un modelo heurístico para el mejoramiento de recolección de pedidos y simulación de eventos discretos en un Centro de Distribución (CEDI) en el departamento del Cauca.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar una distribución de los productos acorde a las características que mejore el uso del espacio en el Centro de Distribución (CEDI).
- Determinar las variables, parámetros y restricciones que caracterizan el modelo heurístico.
- Formular un modelo heurístico que minimice la distancia recorrida para el proceso de preparación de pedidos en el Centro de Distribución (CEDI).
- Validar los resultados arrojados del modelo heurístico mediante la simulación en Flexsim.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1. MARCO TEORICO

#### 4.1.1. Order picking o preparación de pedidos: según Torres. [3]

Consiste en la recolección y combinación de cargas no unitarias para conformar el pedido de un cliente. Puede llevarse a cabo en casi cualquier tipo de almacén y se produce siempre que se necesite juntar paquetes, piezas, productos o materiales para, una vez reunidos, proceder a su traslado.

**Línea de pedido (LP):** Es el número de diferentes artículos o referencias que componen un pedido.

**Picking list o lista de selección:** de acuerdo con S.Rao y G.Adil. [13]

Es una lista que se imprime para que el almacén surta físicamente los productos de un pedido determinado. Generalmente esta lista se ordena conforme a la localización de cada producto en el almacén.

**Tipos de picking:** Piasecki [14], expone los diferentes tipos de recolección de pedidos:

**Recolección de pedido básico:** Es la metodología de preparación de pedidos más básica, donde el inventario se almacena en ubicaciones fijas ya sea en estanterías estáticas o estanterías para paletas. Un operario selecciona un pedido a la vez siguiendo una ruta hacia arriba y hacia abajo en cada pasillo hasta que se selecciona todo el pedido.

**Batch picking o recolección por lotes:** Se encarga de dividir los pedidos múltiples y agruparlos en pequeños lotes. Un operador de pedidos seleccionará todos los pedidos dentro del lote en una sola pasada utilizando una lista de selección consolidada.

**Pick to box o extracción directa:** Es un procedimiento que se basa en una extracción del material agrupado y una introducción directa del mismo en las cajas de envío en el mismo punto de extracción del material, eliminando así el proceso de separación posterior.

**Zone picking o recolección por zonas:** Un método de preparación de pedidos que consiste en dividir las Unidades de Mantenimiento de Existencias (SKU) en una serie de diferentes zonas de cada trabajador de almacén capacitado para recoger dentro de una zona asignada.

**Wave picking o recolección por oleadas:** Agrupar por zonas la separación de los pedidos, basa su eficacia en el concepto estadístico de ruta óptima; esta ruta recorre (bajo el concepto definido en el problema del agente viajero, nunca pasar dos veces

por el mismo sitio) las distintas posiciones de recolección de producto y que empieza a tener relevancia a partir de un cierto número de posiciones diferentes a recorrer.

**Nivel del Picking:** Según Anaya [15], el nivel al que se realiza el picking se cataloga en tres sistemas distintos:

**Picking a bajo nivel:** Las mercancías se recogen siempre desde el nivel del suelo o máximo desde la primera estantería, que es una altura accesible manualmente para el hombre. El proceso es manual, con ayuda de un picking cart que transporta el operario.

**Picking en niveles medios:** La altura en la que podrá ubicarse la mercancía no podrá ser superior a 4 metros. Pensando desde una perspectiva de eficiencia, esta opción sólo sería adecuada si la rotación de productos no es muy alta. Es decir, la mercancía que se destina a los niveles medios no ha de ser la más demandada para un picking de bajo nivel pues será necesario elevarse y descender por entre las estanterías, lo que hará que incurramos en unos mayores costos.

**Picking a alto nivel:** Cuando hay muchos ítems, con un stock relativamente pequeño y de poco movimiento, es más rentable efectuar el picking a alto nivel con ayuda de las llamadas máquinas recoge pedidos, que son picking cart elevadoras en las cuales el operario está situado en una cabina móvil que se eleva con el mástil, permitiéndole acceder manualmente a cualquier altura del almacén.

**Fases del Picking:** Mauleón [16], Define cuatro fases para la realización del picking, las cuales son:

#### **Preparativos:**

- Captura de datos y lanzamiento de órdenes clasificadas.
- Preparación de los elementos de manutención (carretillas o carros).

#### **Recorridos:**

- Desde la zona de operaciones hasta el punto de ubicación del producto.
- Desde un punto de ubicación al siguiente y así sucesivamente.
- Vuelta a la base desde la última posición.

#### **Extracción:**

- Posicionamiento en altura, extracción, recuento, devolución sobrante.

22

- Ubicación sobre el elemento de transporte interno (carretillas o carros).

#### **Verificación y acondicionamiento:**

- Control, embalaje, acondicionado en cajas, precintado, pesaje y etiquetado.
- Traslado a zona de expedición y clasificación por transportistas.
- Elaboración

del packing list del transportista para ser entregado al cliente.

**Tabla 2** Fases y tiempos en picking

Fase	Denominación	Tiempo medio (%)
1	Preparativos	Del 5 al 25%
2	Recorrido	Del 25 al 35%
3	Extracción	Del 10 al 35%
4	Acondicionamiento	Del 15 al 25%
	<b>Total</b>	<b>100%</b>

**Fuente:** Extraído de M. Mauleón, 2013 [16]

Las fases 2 y 3 son las que requieren mayor dedicación de tiempos y será en estas fases donde se deben desarrollar mejoras de productividad sin despreciar las posibilidades existentes en las otras fases.

#### 4.1.2. Costos logísticos.

R. Escalante y J. Uribe [17], definen los costos logísticos de la siguiente manera:

Los costos logísticos se definen como la parte fundamental de la cadena de abastecimiento y representan un límite en las empresas para obtener utilidad, éstos incluyen costos en lo que incurre una organización para realizar las actividades productivas, desde el abastecimiento de materias primas hasta la distribución de la mercancía al consumidor final.



**Figura 8.** Fases de los costos logísticos.

**Fuente:** Extraído de R. Escalante y J. Uribe, 2014. [17]

Es la actividad más costosa del almacén, el cual representa entre el 45% y 75% del coste total de las operaciones como desplazamientos de personal para buscar los productos y retornar a la zona de preparación de pedidos, extracción de la mercancía solicitada de las estanterías y acondicionamiento del pedido.

**4.1.3. Modelos matemáticos de optimización:** Según P. Sánchez y A. Ramos. [18]

Un modelo es una representación matemática simplificada de una realidad Compleja el cual debe equilibrar todos los detalles para encontrar técnicas de solución adecuadas, permitiendo así la ayuda de la toma de decisiones. Por esta razón, sus resultados deben ser fácil mente comprendidos y útiles.

**Estructura de los modelos matemáticos de optimización:** de acuerdo con P. Sánchez y A. Ramos [18], Los problemas de optimización generalmente se componen de tres elementos:

**Función objetivo:** Es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar, ya sea maximizando o minimizando.

**Variables:** Representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo. Desde un punto de vista funcional se pueden clasificar en variables independientes o principales o de control y variables dependientes o auxiliares o de estado, aunque matemáticamente todas son iguales.

**Restricciones:** Representan el conjunto de relaciones expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones que ciertas variables están obligadas a satisfacer. Por ejemplo, la capacidad de producción de la fábrica para los diferentes productos.

**4.1.4. Modelo Heurístico: según R. M. Elbert. [19]**

Es el más comúnmente utilizado para encontrar buenas soluciones a problemas combinatorios, el cual es fácil de implementar y memorizar por parte de los operarios y administradores de un almacén, como alternativa al ruteo óptimo.

**Tabla 3** Modelo Heurístico.

Ventajas	Desventajas
Encuentra buenas soluciones para disminuir los tiempos de recolección de pedidos.	No es posible encontrar soluciones óptimas mediante estos heurísticos.
Fáciles de aprender y de seguir por los operarios.	Presentan caminatas innecesarias para bajos volúmenes de recolección.

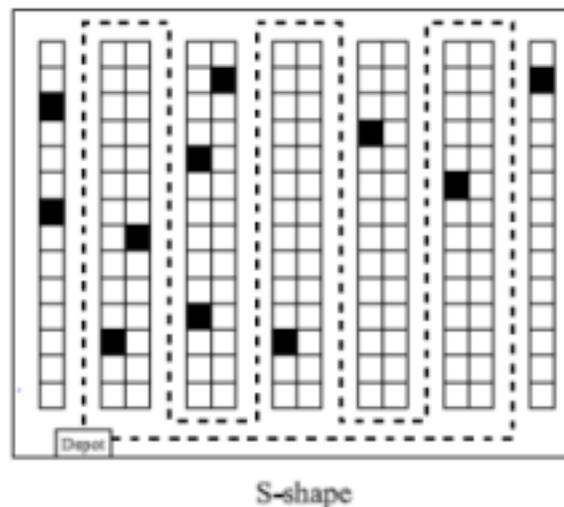
Son fáciles adaptables a diferentes tipos de almacenamiento y distribución.	
---	--

Son flexibles a las desviaciones de ruta de los operarios.	
--	--

**Fuente:** Adecuado de R. M. Elbert, 2017. [19]

**Modelos heurísticos usados en el ruteo de un almacén:** según R. M. Elbert. [19], los modelos heurísticos más populares implementados para el ruteo en almacenes son:

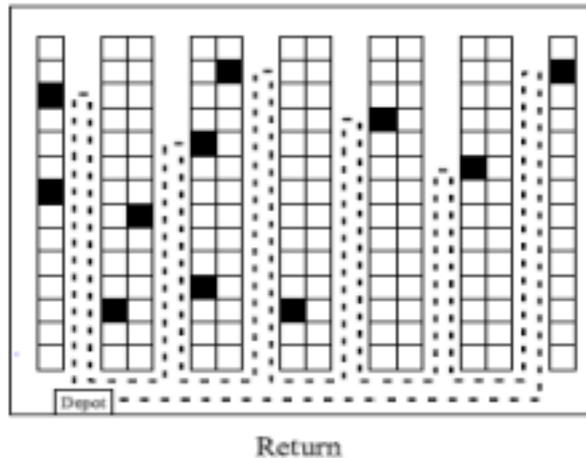
**Transversal o en forma de S:** En esta política el operario entra a un pasillo con al menos un ítem que necesita ser recolectado y lo atraviesa totalmente y luego entra al siguiente que contenga al menos un ítem que deba ser recogido, así consecutivamente hasta que termina, por su simplicidad es la política más utilizada.



**Figura 9.** Política transversal en forma de S.

**Fuente:** Extraído de K. J. Roodbergen, G. P. Sharp, and I. F. A. Vis, 2012. [20]

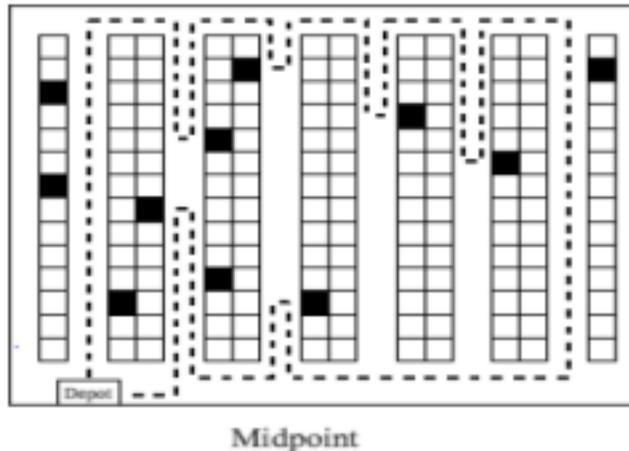
**Picking Con Retorno:** El picking con retorno es otro de los sistemas más simple de separación. Una ruta de retorno consiste en que el operador de bodega entra y sale de un pasillo por el mismo extremo, siempre y cuando el pasillo contenga productos para la separación.



**Figura 10.** Picking con retorno.

**Fuente:** Extraído de N. Purdy, 2012. [21]

**Picking Del Punto Medio:** Se divide en dos mediante una línea imaginaria como se puede observar en la Figura 11. 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.



**Figura 11.** Picking del punto medio.

**Fuente:** Extraído de N. Purdy, 2012 [21]

#### 4.1.5. Programación Computacional de los modelos matemáticos:

Existen varios programas computacionales, en los cuales se desarrollan algoritmos, técnicas y teorías necesarias para resolver en un ordenador los modelos matemáticos de problemas que surgen en un sentido global como lo son la economía, física, química, matemáticas, entre otras áreas. [22]

En el campo de la Ingeniería se hace necesario el uso de potentes herramientas informáticas que ayudan a la simulación y optimización, en definitiva, a la solución de problemas reales que en el pasado era imposible resolver por su complejidad. La herramienta más común para la resolución de este tipo de problemas es el software GAMS, que es un lenguaje de programación que permite desarrollar y trabajar con

modelos complejos.

### **GAMS:**

GAMS (General Algebraic Modeling System), está diseñado específicamente para suplir dos necesidades: la primera modelar problemas de optimización tanto lineales, no lineales y mixtos, la segunda realizar programación matemática. Es especialmente útil para solucionar problemas que sean grandes y complejos, permite construir modelos de gran tamaño que se pueden adaptar rápidamente a nuevas situaciones. [23]

**Estructuras de programación en GAMS:** P. Sánchez y A. Ramos [18], definen las principales estructuras de programación que se tiene disponibles en GAMS.

**Programación Lineal (LP):** todas las variables son de tipo continuo y solamente se permiten relaciones lineales entre las mismas.

**Programación Lineal Entera Mixta (MILP):** las variables pueden ser de tipo continuo o discreto y solamente se permiten relaciones lineales entre las mismas.

**Programación No Lineal (NLP):** todas las variables son de tipo continuo y se permiten relaciones lineales y no lineales entre las mismas.

**Programación No Lineal Entera Mixta (MINLP):** las variables pueden ser de tipo continuo o discreto y se permiten relaciones lineales y no lineales entre las mismas.

### **4.1.6. Simulación:**

F. Santana y R. Granillo [24], define la simulación como:

Una imitación de la operación de un proceso en el mundo real o de un sistema a través del tiempo ya sea manual o con ayuda de un software como lo es Flexsim, conduciendo experimentos con el propósito de entender el comportamiento del sistema.

**Software Flexsim:** Es un software para la simulación de eventos discretos, que permite modelar, analizar, visualizar y optimizar cualquier proceso industrial, desde procesos de manufactura hasta cadenas de suministro. Además, Flexsim es un

programa que permite construir y ejecutar el modelo desarrollado en una simulación dentro de un entorno 3D desde el comienzo. [25]

#### **4.1.6.1. Modelos de simulación del software Flexsim:**

A continuación, se definen algunos de los modelos según su enfoque [26]:

**Modelo discreto:** En este tipo de simulación, es representado por una serie de eventos cronológicos, que provocan los cambios correspondientes en el estado de los objetos en el sistema. Estos eventos ocurren en tiempo real durante la ejecución de la simulación. Luego, pueden medirse estos eventos y estados para recopilar métricas útiles sobre el sistema. Puede utilizar esta información para medir la eficacia de posibles cambios en su sistema empresarial.

**Modelo analítico:** Están basados en técnicas asociadas a la teoría de colas, consistiendo esencialmente en nodos unidos entre sí en una red multinivel. La simulación analítica pone de manifiesto múltiples aspectos ligados a la complejidad dinámica de los procesos en los que varios agentes compiten por un mismo recurso, así como la variabilidad asociada a procesos de entrada y salida.

**Modelos dinámicos:** El sistema que se analiza en estos modelos cambia respecto al tiempo. Por ejemplo, el número de personas que hacen fila para entrar a una sala de cine varía con el tiempo.

**Modelos estocásticos:** Son relaciones de cambio constante entre las variables y el modelo. Por ejemplo, si en un modelo una caja contiene 5 productos, cada vez que se añada una caja al inventario, este incrementará en 5 unidades.

#### 4.1.6.2. Definiciones en un estudio de simulación:

En un estudio de simulación es necesario comprender los conceptos básicos que abarca un modelo. Entre los más importantes se encuentran los siguientes:

**Evento discreto:** Es un conjunto de relaciones lógicas, matemáticas y probabilísticas que componen un sistema bajo estudio. El objetivo de un modelo de simulación consiste en comprender, analizar y mejorar las condiciones de operación.

**Sistema:** Conjunto de elementos que interaccionan entre sí para funcionar como un todo.

**Estado del sistema:** Es la condición en que se encuentra el sistema bajo estudio en un momento determinado. El estado del sistema está compuesto por variables o características de operación puntuales.

28

**Entidad:** Es la representación de los flujos de entrada y salida en un sistema. Una entidad dentro de un sistema se encarga de que el estado del sistema cambie.

**Evento:** Es un cambio en el estado actual del sistema; puede ser la interrupción o finalización de un proceso, la falla de un equipo, el descanso de un operario, etc.

**Localizaciones:** Son los lugares o áreas a las que un material puede llegar para ser transformado o esperar a serlo. Estas localizaciones pueden ser bodegas, almacenes, bandas transportadoras, máquinas, entre otras.

**Recursos:** Son dispositivos necesarios para una correcta operación, por ejemplo,

un montacargas que transporta materiales de un lugar a otro.

**Atributo:** Es una característica de una entidad, como el peso, volumen, color, entre otros.

**Variables:** Son condiciones cuyos valores se pueden crear y modificar haciendo uso de ecuaciones matemáticas o relaciones lógicas.

**Reloj de simulación:** Es el contador de tiempo de la simulación; su función es responder preguntas, como el tiempo que utilizó la simulación o cual sería el tiempo óptimo esperado.

#### 4.2.ESTADO DEL ARTE

En el Cuadro 1 se presenta una revisión de artículos de proyectos e investigaciones más representativas relacionadas con diseño, optimización, simulación y distribución en planta, desde el año 2010 hasta el 2018.

**Cuadro 1.** Estado del arte de publicaciones relacionadas con el alistamiento de pedidos.

Título	Año	Objetivo	Método	Resultados	Conclusiones
--------	-----	----------	--------	------------	--------------

Routing order pickers in a warehouse: a comparison between optimal and heuristic solutions. [27]	2010	Determinar las rutas de recolección de pedidos mediante un modelo heurístico para un almacén convencional.	En la práctica, el problema se resuelve principalmente mediante el uso de un modelo heurístico, se compara con tres aspectos: (1) almacén de paletas de gran altura con pasillo estrecho; (2) picking con artículos desordenados; y (3) recolección de pedidos convencional con pasillos anchos.	Los resultados numéricos sugieren que el ahorro del tiempo de viaje puede ser considerable cuando se utilizan algoritmos heurísticos óptimos. Donde la ganancia proporcional del promedio de viaje y el tiempo total dependen en gran medida del promedio de artículos por pasillo.	El tiempo de v abarca alrededor 50% del tiempo t En muchos almace modernos, los pic car de gran al tienen que viajar de un pasillo reemplazados picking multifuncionales. E no solo responsables de recolección pedidos, sino tam realizar diferen tareas como almacenamiento y recuperación de p llenos.
<b>Título</b>	<b>Año</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>	<b>Conclusiones</b>
Order batching in a pick-and-pass warehousing system with group genetic algorithm. [28]	2015	Desarrollar una orden de selección de pedidos por lotes mediante un algoritmo genético considerando la menor cantidad de lotes formados.	Mediante un modelo de simulación basado en Flexsim, se usa para implementar el algoritmo propuesto y comparar el rendimiento con diferentes políticas de recolección de pedidos.	Los resultados del experimento indican que el modelo matemático con política de picking por pedido propuesto es estadísticamente superior al de la política de procesamiento por lotes.	Al escoger la política de recolección adecuada garantizar que todos los pedidos se entregados a tiempo al cliente final.

30

**Cuadro 1.** (Continuación)

<b>Título</b>	<b>Año</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>	<b>Conclusiones</b>
---------------	------------	-----------------	---------------	-------------------	---------------------

Optimizing the storage assignment in a warehouse served by milkrun logistics. [29]	2015	Proponer un modelo MIP para encontrar una política de alistamiento o basada en clases que minimice el tiempo de selección de pedidos.	Utilizando la logística de milkrun, se identifican elementos importantes para el despacho, entrega y recolección de los pedidos, los cuales serán tenidos en cuenta en la programación del modelo matemático.	El modelo matemático MIP propuesto y la política de alistamiento por pedido, se ha demostrado en experimentos computacionales que el enfoque propuesto da como resultado una disminución de hasta el 38% del tiempo del picking, comparado con el enfoque clásico del alistamiento de pedidos.	El enfoque propuesto ofrece una serie de ventajas sobre la solución previa basada en agrupación, permitiendo modelado explícito del rendimiento de selección de la búsqueda de compensación óptima entre criterios conflictivos como el mínimo tiempo de ciclo de pedido y el esfuerzo de recolección promedio. Puede mejorar el modelo de almacén, con zonas con diferentes capacidades, o puede extenderse fácilmente a varios tipos de ranuras.
<b>Título</b>	<b>Año</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>	<b>Conclusiones</b>
Zone merge sequencing in an automated order picking system. [30]	2017	Reducir el tiempo de inactividad o el espacio abierto mediante la optimización de las secuencias de fusión entre zonas	Se utiliza una metodología en la cual se desarrolla un modelo matemático para encontrar las secuencias de fusión con un tiempo mínimo de cumplimiento de pedidos. Desarrollando así un enfoque codicioso basado en la solución heurística.	El rendimiento del experimento muestra que la solución presentada puede reducir el tiempo de cumplimiento de la orden aproximadamente un 5% tanto con datos empíricos como con datos de simulación.	Finalmente, el tiempo de inactividad disminuirá cuando aumente el tamaño de la zona, pero el costo también aumentará. Por lo tanto, el tamaño de la zona debe decidirse por la compensación entre el costo y la eficiencia de picking.

<b>Título</b>	<b>Año</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>	<b>Conclusiones</b>
---------------	------------	-----------------	---------------	-------------------	---------------------

Picker routing in rectangular mixed shelves warehouses. [31]	2018	Diseñar una metodología de enrutamiento para la recolección con un almacenamiento disperso.	Mediante la metodología de algoritmo heurística se pretende buscar la ruta más corta para la recolección de pedidos en el almacén.	Los resultados muestran que, con un gran porcentaje de elementos idénticos para ser reunidos en un almacenamiento disperso, provoca un aumento dramático en la duración del recorrido de picking. Obviamente, este fenómeno ocurre porque los operarios deben visitar varios puestos dentro del almacén para satisfacer un orden en lugar de encontrar la cantidad demandada de artículos en posiciones de almacenamiento adyacentes.	El procesamiento de órdenes de diversidad indica que la dispersión de la tarea debe ser minimizada para acortar significativamente los recorridos de recolección. Con el cambio, con órdenes de baja diversidad a bajo nivel de dispersión es más atractivo.
<b>Título</b>	<b>Año</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>	<b>Conclusiones</b>
A study of storage assignment problem for an order picking line in a pick-and-pass warehousing system. [32]	2018	Desarrollar un modelo analítico para el sistema de pick-and-pass para la estimación de la distancia esperada recorrida por el operario en una línea de selección.	Para realizar el estudio se utiliza una línea de picking, la cual se modelará como una cadena de Markov, para calcular la distancia recorrida por el operario en la línea de picking.	La política de almacenamiento aleatorio es ampliamente usada en muchos almacenes porque es fácil de usar, a menudo requiere menos espacio que otros métodos de almacenamiento y da como resultado un mejor nivel de utilización de todos los pasillos en el picking.	Un problema al que se enfrenta es la posición inicial de los contenedores en la zona. Ya que la posición inicial puede tener impacto en el desempeño de la selección la cual es enmarcada en la evaluación de la distancia de los operarios.

32

**Cuadro 1.** (Continuación)

<b>Título</b>	<b>Año</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>	<b>Conclusiones</b>
---------------	------------	-----------------	---------------	-------------------	---------------------

Picker routing in the mixed-shelves warehouses of e-commerce retailers. [33]	2018	Diseñar un modelo heurístico para el problema de alistamiento o de pedidos para un almacén con estantería mixta.	Utilizando el software Gurobi, se compara el almacenamiento de estantería mixta con el almacenamiento tradicional, pero también las políticas de recolección para pedidos pequeños y grandes. De esta manera, investigamos si el almacenamiento en estantes mixtos también es una política adecuada.	El almacenamiento de estantes mixtos es especialmente adecuado para pedidos pequeños que exigen solo unos pocos artículos por línea de pedido. Tan pronto como se produzca un pedido mayor, el stock en un solo estante puede no ser suficiente, y el operario tiene que visitar varias posiciones de almacenamiento con el fin de reunir suficientes artículos. Así, los pedidos de gran tamaño aumentan el esfuerzo de recolección con almacenamiento de estantes mixtos.	Los almacenes estantes mixtos es la mejor opción para el mercado minorista en línea ya que las cartillas unitarias desglosan y artículos del mismo SKU se encuentran repartidos por todos los estantes. Permitiendo durante enrutamiento operario facilita la recuperación de SKU en específico.
<b>Título</b>	<b>Año</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Método</b>	<b>Resultados</b>	<b>Conclusiones</b>
Determining the number of zones in a pick-and-sort order picking system. [34]	2018	Determinar el número óptimo de zonas de modo que el tiempo total (recolección y empaque) para completar un lote sea mínimo.	Se plantea una metodología la cual resuelve este problema mediante la asignación óptima de elementos para elegir rutas en cada zona. Este método se ilustra mediante los datos tomados de un CEDI de uno de los minoristas.	Nuestros resultados muestran que, para un tamaño de orden dado, el tiempo de producción promedio disminuye y luego aumenta si la lista de selección también lo hace. El tiempo de rendimiento no es convexo en el número de zonas, en general, el método puede aplicarse fácilmente a empresas con zonas idénticas y lotes sincronizados.	En la situación actual, se utiliza almacenamiento aleatorios y enrutamientos en forma de S. Sin embargo, es posible usar otras estrategias de almacenamiento enrutamiento siempre que las rutas estén sincronizadas. Esto solo afectará el tiempo de viaje.

#### 4.3.MARCO LEGAL

En el Cuadro 2 se consideran leyes y normatividad que contemplan en los almacenes o CEDI y en la preparación de pedidos en Colombia.

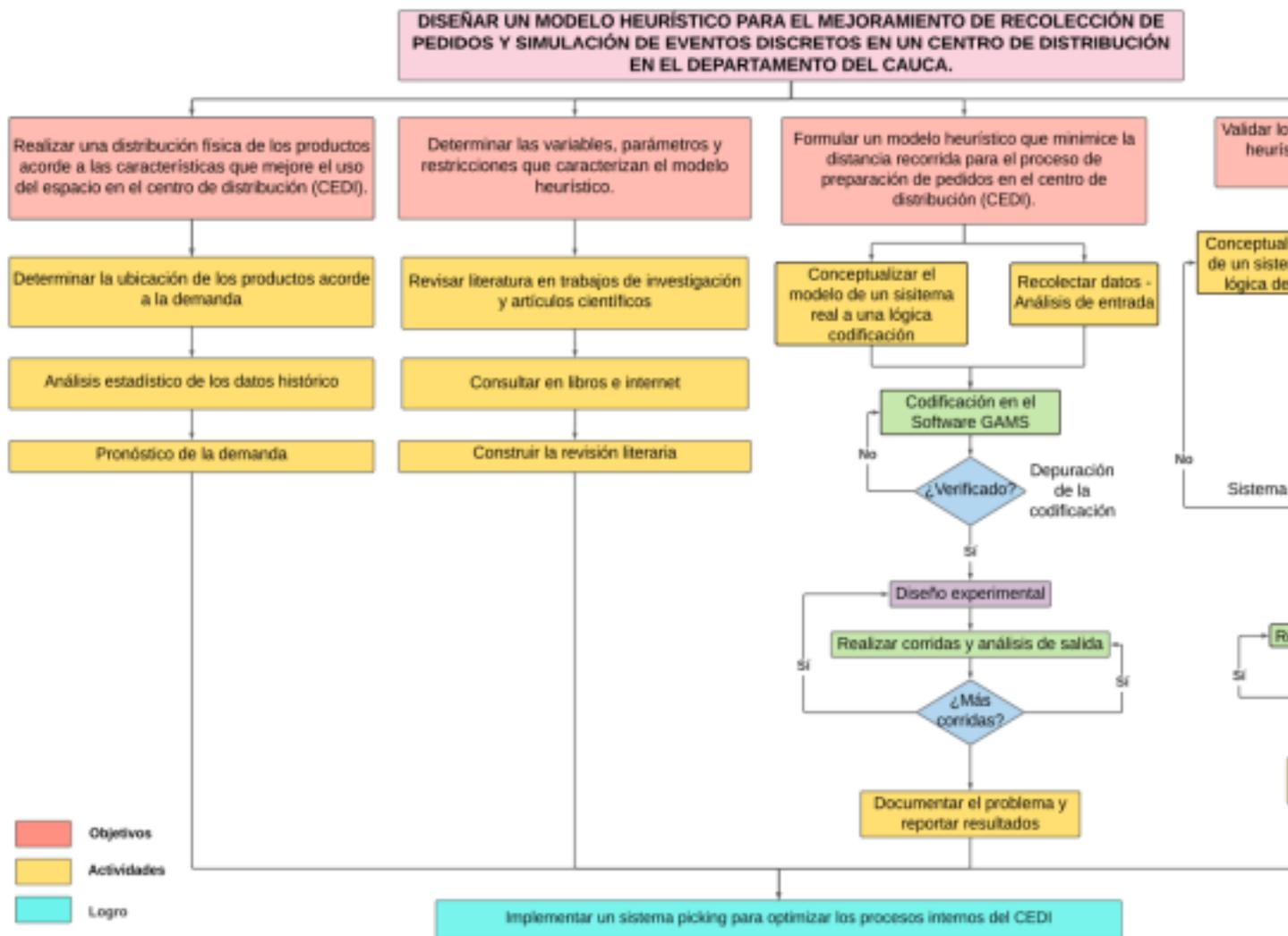
**Cuadro 2.** Leyes y normatividad vigente.

<b>NORMA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
Ley 9ª de enero 24 de 1979: Protección de la salud humana. [35]	Artículo 120: Los vehículos, equipos, bandas transportadoras y demás elementos para manejo y transporte de materiales, se deberán mantener y operar en forma segura. Artículo 121: El almacenamiento de materiales u objetos de cualquier naturaleza deberá hacerse sin que se creen riesgos para la salud o el bienestar de los trabajadores o de la comunidad.

Resolución 2400 de 1979. [36]	Mediante esta resolución se establecen algunas disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad industrial en los establecimientos de trabajo.
Manual de seguridad para almacenamiento en estanterías. [37]	El presente Manual de Seguridad para almacenamiento en estanterías se elaboró con base en recomendaciones establecidas en la Norma Técnica de Prevención NTP 859 de 2009.
CONPES 3527 del 2008 Política Nacional de Competitividad y Productividad. [38]	Establece las estrategias para el desarrollo del sistema logístico nacional y su apoyo efectivo al incremento de competitividad y productividad.
ISO 3394. [39]	Resistencia a cargas de compresión: $\geq 1,500$ Kg. Las estibas deben aguantar el peso de la carga más un factor de 15%. Materiales de las estibas: madera, cartón, plástico de alto impacto y metales como el aluminio y el acero inoxidable. Tipo A: 800 x 1.200 mm. Tipo Americano o "Standard". En el resto del mundo son de 1.200 x 1.000 mm.
OIT. [40]	En el año 1967 la OIT reglamentó que por razones ergonómicas ninguna carga que se manipule por fuerza humana durante alguna de las etapas del proceso DFI, podrá pesar más de 50 Libras (22.5 kilogramos).

## 5. DISEÑO METODOLÓGICO

Para esta investigación se diseñó una metodología basada en los autores Rao and Adil [13], permitiendo dar cumplimiento a los objetivos propuestos, inicialmente se hace una distribución física de los productos acorde a las características que mejore el uso del espacio en el CEDI; posteriormente se realiza una revisión de las variables, parámetros y restricciones que caracterizan el modelo heurístico. Esta revisión permitió construir una revisión bibliográfica referente para la investigación descrita en la subsección 4.2; posteriormente el modelo heurístico se codificó en el software GAMS (General Algebraic Modeling System), el cual se tiene como objetivo minimizar la distancia recorrida para el proceso de preparación de pedidos; finalmente, se evalúan los resultados del modelo heurístico utilizando la simulación de eventos discretos en el software Flexsim del proceso de preparación de pedidos. En la Figura 12 y Cuadro 3 se especifican las actividades a desarrollar en cada uno de los objetivos planteados.



36

**Cuadro 3.** Actividades relacionadas con el desarrollo del proyecto

OBJETIVO	ACTIVIDAD	INSTRUMENTO	PRODUCTO A OBTENER
Realizar una distribución física de los productos acorde a las características que mejore el uso del espacio en el centro de distribución (CEDI).	Determinar la ubicación de los productos acorde a la demanda	Microsoft Excel	Clasificación ABC y Análisis estadístico del CEDI
	Análisis estadístico de los datos histórico		
	Pronóstico de la demanda	SPSS Statistics versión 23	Pronóstico de la demanda
Determinar las variables, parámetros y restricciones que	Revisar literatura en trabajos de investigación y artículos científicos	Computador y biblioteca institucional	Definición de las variables y restricciones para

caracterizan el modelo heurístico.	Consultar en libros e internet	(bases digitales y libros)	el diseño del modelo heurístico
	Construir la revisión literatura		
Diseñar un modelo heurístico que minimice la distancia recorrida para el proceso de preparación de pedidos en el centro de distribución (CEDI)	Determinar los conjuntos y parámetros del modelo	Cálculos matemáticos	Demanda de los productos, tiempo de recorrido y distancias
	Determinar las variables de decisión, función objetivo y restricciones	Computador	Modelo matemático
	Codificar el modelo matemático en el software GAMS.	GAMS versión 24.4.6	Distancia mínima recorrida e identificación de las rutas de recolección
	Realizar iteraciones	GAMS versión 24.4.6	Posibles soluciones
	Analizar los resultados obtenidos en el software	Observación	Obtención de una solución optima
Validar los resultados arrojados mediante la simulación en Flexsim comparándolos con la situación actual del centro de distribución (CEDI)	Construcción del modelo de simulación	Software de simulación Flexsim versión 20.2.3	Modelo de simulación planteado por los resultados del modelo matemático
	Validación del modelo de simulación	Comparación de seis conjuntos de datos	Comparación aproximada a la situación real
	Simulación de la propuesta	Software de simulación Flexsim versión 20.2.3	Modelo de simulación de la mejora.

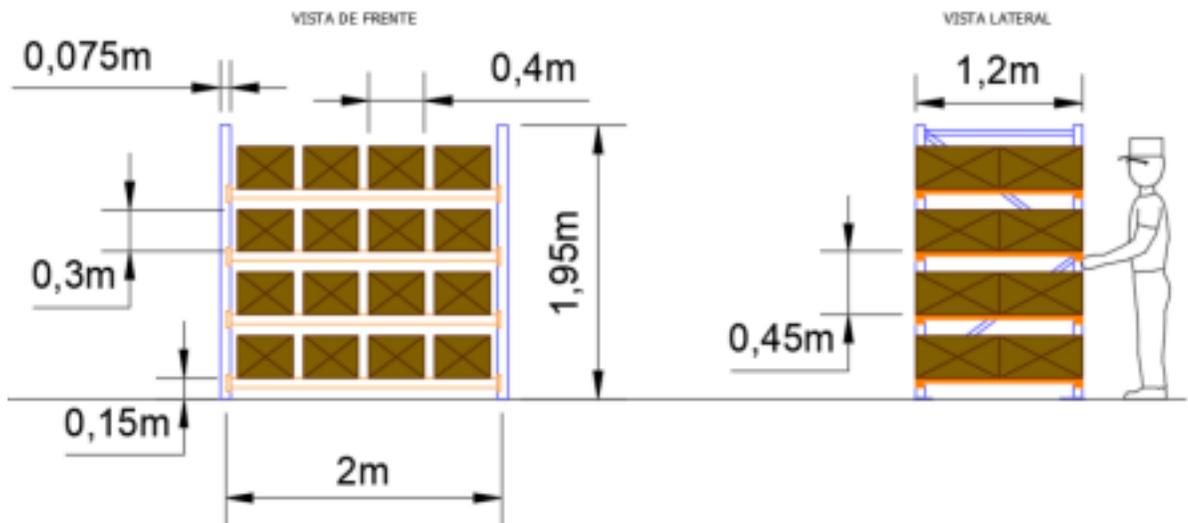
## 6. RESULTADOS

### 6.1.DISTRIBUCIÓN DE LOS PRODUCTOS EN EL CENTRO DE DISTRIBUCIÓN

#### 6.1.1. Identificación de la estructura del CEDI

Mercurius Inc., es una empresa de venta de artículos tecnológicos en internet, manejando 50 referencias de artículos (ver anexo 1); El área de almacenamiento

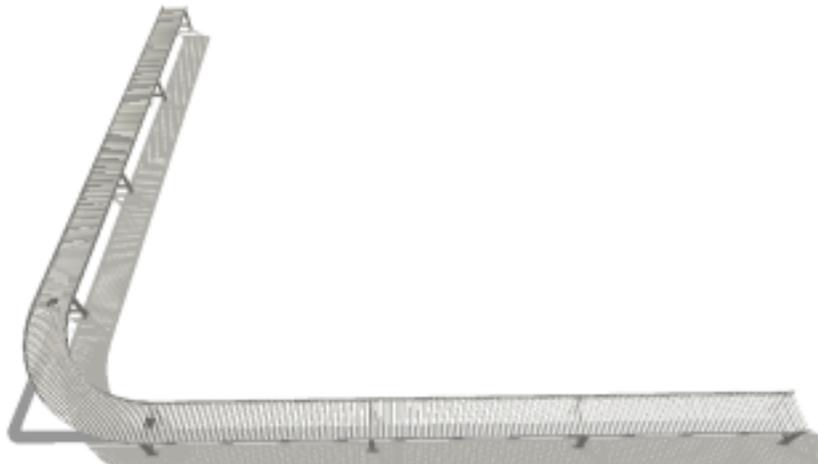
consiste en 50 estanterías livianas (ver Figura 13) distribuidas de tal forma que los operarios puedan realizar la preparación de pedidos con los picking carts.



**Figura 13.** Dimensión de la estantería liviana.

**Fuente:** Adaptado de Mercurius Inc, 2019. [2]

En el área de alistamiento de pedidos se tiene una conveyor band, permitiendo el transporte de las cajas al muelle de despacho (ver Figura14), además se tendrá una mesa (ver Figura 15) para el proceso de alistamiento, impresión de facturas, etiquetado correspondiente a cada pedido y sellado.



**Figura 14.** Banda transportadora.  
**Fuente:** Adaptado de Mercurius Inc, 2019. [2]



**Figura 15.** Mesa de alistamiento.  
**Fuente:** Adaptado de Mercurius Inc, 2019. [2]

Se procede a calcular el área de la zona almacenamiento y de la zona de alistamiento de la siguiente forma:

$$\text{Área de la zona de almacenamiento} = \text{Ancho [m]} * \text{Largo [m]} \text{ (Ec.1) } \text{Área de la}$$

$$\text{zona de alistamiento} = \text{Ancho [m]} * \text{Largo [m]} \text{ (Ec.2)}$$

$$\text{Área Total [m}^2\text{]} = \text{Área de la zona de almacenamiento} + \text{Área de la zona de alistamiento} \text{ (Ec.3)}$$

En la Tabla 4 se muestran los resultados del área de trabajo.

**Tabla 4.** Cálculo área total de trabajo.

Medidas	Datos (M <sup>2</sup> )
---------	-------------------------

Área de la zona de almacenamiento	418
Área de la zona de alistamiento	413
<b>Área Total</b>	<b>831</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

Estos resultados se pueden observar representados en la Figura 16.

Por otro lado, el ancho de los pasillos centrales de la zona de almacenamiento es de 2,5 m y de 0.6 m de los pasillos laterales, los cuales tienen un largo de 20 m, permiten un libre movimiento de los trabajadores como se puede observar en la Figura 17, facilitando así el desarrollo de las actividades de alistamiento de pedidos.

Zona de Almacenamiento  
418 m<sup>2</sup>  
Zona de Alistamiento  
413 m<sup>2</sup>

**Figura 16.** Zona de almacenamiento y alistamiento de pedidos.  
**Fuente:** Extraído de Mercurius Inc., 2019. [2]

**Figura 17.** Layout de zona de picking.  
**Fuente:** Extraído de Mercurius Inc., 2019. [2]

### **6.1.2. Clasificación ABC**

La clasificación ABC, permite organizar las distintas mercancías dentro del almacén a partir de su relevancia para la empresa, de su valor y de su rotación. Con este sistema se prioriza la adquisición y colocación de los productos no por su volumen o cantidad, sino por el aporte económico que suponen para la empresa. [41]

Los artículos o productos según su importancia y valor se pueden clasificar en las siguiente tres clases:

Tipo A: dentro de este tipo se involucran los artículos que, por su costo elevado, alta inversión en el inventario, nivel de utilización o aporte a las utilidades necesitan de un 100% en el control de sus existencias.

Tipo B: esta clasificación comprende aquellos productos que son de menor costo y menor importancia; y los cuales requieren un menor grado de control.

Tipo C: en esta última clasificación se colocan los productos de muy bajo costo, inversión baja y poca importancia para el proceso productivo; y que tan solo requieren de muy poca supervisión sobre el nivel de sus existencias.

Según Wild [42], para una buena clasificación ABC, se recomienda una distribución alrededor de los siguientes valores

Ítems clase A: 10% del total de ítems, con alrededor del 65% del total de ventas.

Ítems clase B: 20% del total de ítems, con alrededor del 25% del total de ventas.

Ítems clase C: 70% del total de ítems, con alrededor del 10% del total de ventas.

Realizando una revisión de la base de datos de los pedidos brindada por la empresa para el desarrollo del estudio, la cual maneja 50 referencias ( ver anexo 1), se logró identificar que en el período de tiempo que estuvo bajo estudio, entre el 1 septiembre de 2018 a 29 marzo de 2019, el SKU con la referencia 20768, el cual representa la Memoria USB 32 GB reflejó la mayor demanda con un total de 2.587 unidades despachadas y el SKU con la referencia 25631 el cual representa el Micrófono inalámbrico con bluetooth tan sólo fueron despachadas 6 unidades.

**Tabla 5.** Resumen clasificación ABC.

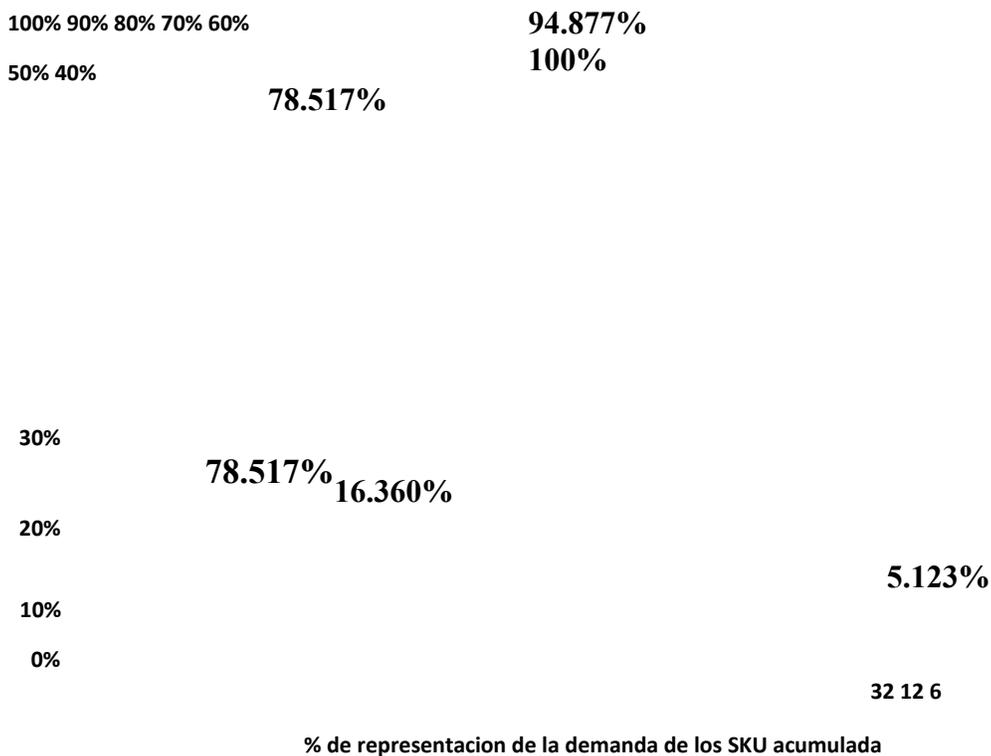
Clasificación	Numero de SKU	% SKU	% Acumulado de los SKU	% De representación de la demanda de los SKU	% De representación de la demanda de los SKU acumulada
<b>A</b>	32	64%	64%	78,52%	78,517%
<b>B</b>	12	24%	88%	16,36%	94,877%
<b>C</b>	6	12%	100%	5,12%	100%
<b>Total</b>	<b>50</b>	<b>100%</b>		<b>100%</b>	

**Fuente:** Elaboración propia.

En la Tabla 5, se muestra el resumen de los resultados obtenidos en la clasificación, con el respectivo porcentaje de participación acumulado para cada categoría y el número de SKU catalogados en cada una de ellas, concluyendo que el 64% de los

productos (32 artículos) son clasificación tipo A, que corresponde a un nivel de inversión del 78,52%; el 24% de los artículos (12 productos) quedan clasificados como tipo B y corresponden al 16,36% del valor invertido; mientras que una cantidad de 6 productos (12%) corresponden a clasificación tipo C, con un nivel de inversión proporcional mente baja del 12%.

La tabla completa de la clasificación, con sus respectivos pesos, porcentaje de participación y porcentaje de participación acumulado, se muestra en detalle en el anexo 2.



**Figura 18.** Diagrama de Pareto. **Fuente:** Elaboración propia.

Por medio del análisis de Pareto (ver Figura 18), 78,52% de los productos almacenados representan el 80% del volumen total, evidenciándose que son los productos con mayor rotación y que representan una gran inversión de almacenamiento para la bodega. Lo que quiere decir que son prioridad en la gestión de pedidos, con el fin de garantizar el producto a tiempo y cantidades requeridas.

Mercurius Inc., a definido una política de ordenamiento de los SKU entre los pasillos, la cual deberá ser en forma transversal, de este modo las 50 referencias de la bodega de almacenamiento fueron distribuida acorde a los resultados arrojados por el análisis de la clasificación ABC y del plano de la bodega, empezando en la referencia 20768 y finalizando en la referencia 25631 como se puede observar en la Figura 19, permitiendo un mejor control de los SKU más solicitados y requerir menos movimientos para gestionarlos.

**Figura 19.** Clasificación ABC en la bodega de almacenamiento. **Fuente:** Elaboración propia.

A partir de los resultados de la distribución física anteriormente identificada en la sección 6.1.1 y clasificación ABC realizada en la sección 6.1.2, permitió la organización de los productos dentro del CEDI, por consiguiente, se determina una ubicación fija para definir una matriz de distancia entre las posiciones de cada producto.

45

Estos resultados se utilizan para definir las restricciones, parámetros y variables del modelo matemático heurístico formulado en la sección 6.2, teniendo como objetivo principal encontrar rutas de recolección con la menor distancia recorrida.

## **6.2.MODELO MATEMÁTICO**

Después de realizar una revisión de la literatura de las diferentes formulaciones para el problema de recolección de pedidos y los diferentes métodos utilizados para resolverlos, se realizó la siguiente formulación matemática que atiende a cada uno de los requerimientos del sistema de operación de la empresa en estudio.

### **6.2.1. Selección del modelo matemático**

El problema de preparación de pedidos, el cual se denomina Problema de Enrutamiento de Selector (PRP). El modelo matemático propuesto está basado en el Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP), donde el objetivo principal es minimizar la distancia total recorrida para completar el proceso de preparación de pedidos.

### 6.2.2. Supuestos del modelo

A continuación, se describe los supuestos para la formulación del modelo. Algunos supuestos son propios del modelo matemático VRP y otros son de la información suministrada por la empresa.

- La suma de las unidades sustraídas por el operario para completar el pedido no debe exceder la picking cart.
- Todos los picking cart que parten del put wall o nodo cero deben regresar al mismo.
- Los racks deben ser visitados una sola vez por el picking cart asignado. · La matriz de distancia es simétrica y está asociada a condiciones propias del CEDI (ancho y largo de los pasillos).
- Todos los picking cart tienen una capacidad de treinta (30) unidades. · La oferta de los productos está dada en unidades.

### 6.2.3. Formulación matemática del modelo

En esta parte se presenta los índices, parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones del modelo a partir de los supuestos enunciados y características de la investigación. A continuación, se describe las características que se tuvieron en cuenta en la investigación:

**Función objetivo:** minimiza la distancia total recorrida para completar el proceso de preparación de pedidos.

46

**Parámetros:** es la información de la distancia entre los nodos de origen hasta los nodos de destino, entre otros.

**Restricciones:** son las ecuaciones asociadas a la capacidad de los picking cart, eliminación de sub tours, inventario suficiente y propias del modelo VRP.

Para el desarrollo de la matriz de distancia se toma como referencia los parámetros que tiene en cuenta el CEDI, los cuales son ancho y largo de los pasillos, números de rack y tipo de picking cart.

De esta forma el modelo matemático propuesto basado en el Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP) para la preparación de pedidos tiene como base la programación lineal entera mixta y el modelo diseñado por Shetty, Sah y Chung; quienes abordan el Problema de Enrutamiento del Selector (PRP) como un Problema de Enrutamiento de Vehículos (VRP) y además aplican la formulación de Miller- Tucker - Zemlin (MTZ). [44] [45]

Con esto, se busca determinar rutas para completar el proceso de preparación de pedidos en un CEDI y con una demanda asociada, con una flota de picking cart homogénea con capacidad finita.

Por último, para complementar el modelo propuesto y como sustento teórico se tiene en cuenta las siguientes referencias [31] [46] [47] [48] [49].

**Figura 20.** Metodología para el diseño del modelo matemático.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Por consiguiente, la formulación del modelo se describe de la siguiente

manera: **Conjunto**

$N = \{1, 2, 3 \dots n\}$  Conjunto de todos los nodos formados por  $i$  y  $j$ , excluyendo el nodo cero.

$N_0 = \{0\} \cup N: \{1, 2, 3 \dots n\}$  Conjunto de todos los nodos formados por  $i$  y  $j$ , incluyendo el nodo cero.

$K = \{1, 2, 3 \dots k\}$  Conjunto de picking cart.

**Variables:**

$d_{ij}$  Distancia en metros desde el punto de partida  $i$  hasta el de

llegada  $j$ .  $q_{ij}$  Demanda en unidades en el nodo  $ij$

$q_{ik}$  Cantidad de artículos en unidades almacenados en el

nodo  $ik$ .  $c_k$  Capacidad en unidades del picking cart  $k$ .

**Variable binaria**

$x_{ijk}$  Variable de decisión binaria que toma el valor de 1 si se realiza el recorrido en el picking cart  $k$  para viajar desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ . 0 en caso contrario.

$y_{ik}$  Variable de decisión binaria que toma el valor de 1 si se asigna al nodo  $i$  para ser atendido por el picking cart  $k$ . 0 en caso contrario.

**Función objetivo:**

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N_0} \sum_{k \in K} T_{ijk} * X_{ijk}$$

La función objetivo se presenta uno de los aportes de esta investigación que es la distancia en metros para completar el proceso de preparación de pedidos asociada a las condiciones del CEDI, teniendo en cuenta el ancho y largo de los pasillos.

**Restricciones:**

Las ecuaciones (1) y (2) limitan el número de rutas por picking cart. La primera hace referencia al número de veces que un vehículo sale del nodo  $i$  y la segunda el

número de veces que llega al nodo  $i, j$ .

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall i, j \in N \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} x_{0i}^k = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k = \sum_{k \in K} x_{ji}^k \quad \forall i, j \in N \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq 1 \quad \forall i, j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i, j \in N \quad (4)$$

Las ecuaciones (3) y (4) aseguran que todos los picking carts terminen y comiencen su recorrido en el punto de partida o nodo cero.

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{0i}^k = \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{i0}^k$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} x_{i0}^k = C$$

$$= C \quad (3) = C \quad (4)$$

La restricción (5) asegura la continuidad del modelo, es decir, si el picking cart visita el nodo  $i, j$ , este debe abandonarlo para pasar a otro nodo.

$$-\sum_{k \in K} x_{ij}^k + \sum_{k \in K} x_{jk}^k = 0 \quad \forall i, j \in N \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k = 0 \quad \forall i, j \in N$$

La restricción (6) asegura que cada nodo sea asignado exactamente a un único picking cart.

$$\sum_{k \in K} u_{ij}^k = 1 \quad \forall i, j \in N \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} u_{ij}^k = 1 \quad \forall i, j \in N$$

La restricción (7) asigna el nodo  $i, j$  al picking cart  $k$  que pasa por ese nodo.

$$\sum_{k \in K} u_{ij}^k = 1 \quad \forall i, j \in N \quad (7)$$

$$= u_{ij}^k \quad \forall i, j \in N$$

La restricción (9) Asegura que no exceda la capacidad del picking cart.

$$* U_{i,j} \leq C \quad \forall i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (8)$$

$$\sum D_{i,j} \leq C$$

Por último, la restricción (10) y (10.1) funciona como ecuación para eliminar los sub tours.

$$O_{i,j} - O_{j,i} + C * X_{i,j} \leq C - \{i, j\} \quad (9)$$

$$D_{i,j} \leq O_{i,j} \leq C \quad (9.1)$$

#### 6.2.4. Parametrización

En esta sección se describe la información y datos recolectados para el anterior modelo matemático. Los parámetros fueron determinados mediante fuentes primarias, secundarias e información de la empresa.

**Tipo de vehículos:** los vehículos seleccionados para ser codificados en el modelo fueron cuatro (4) picking cart, con una capacidad cada uno de 30 unidades, el cual tiene un estante de acero especial que le permite usar imanes para mantener los documentos en su lugar mientras selecciona piezas y productos. Tres estantes con barras laterales de retención sostienen firmemente las piezas en su lugar.

**Figura 21.** Picking cart.

**Fuente:** Extraído de Cisco-Eagle. [50]

**Demanda:** este parámetro se determina mediante el análisis de los datos históricos, que posteriormente se realizó un pronóstico de la demanda obteniendo datos precisos en el comportamiento de la demanda, desde el año 2019 hasta el año 2024, el cual fue determinado por la empresa de estudio.

Los datos utilizados en la codificación del modelo matemático, fueron los del pronóstico de la demanda como se puede ver en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Demanda de los SKU.

Descripción	SKU	Demanda de los SKU (unidad/día)
Memoria USB 32 GB	20768	5
Mouse inalámbrico ARC Touch	81600	4
Parlante inalámbrico bluetooth	16741	1
Audífono de diadema extra bass	59692	3
Control gaming tipo playstation	57462	3
Disco duro Adata HD330 de 1TB	41676	4
Parlante USB SP100	65001	1
Mouse inalámbrico 3000 negro	28636	2
Memoria USB 16 GB	43825	2
Mouse óptico mini retráctil	71753	7
Mouse inalámbrico gamer	62299	2
Audífono de diadema con micrófono	53371	2
Audífono Maxell Solid con micrófono	24587	2
Cámara IP Inalámbrica	40005	2
Cámara Estabilizadora	60289	2
Calculadora científica SHARP	63880	2
Teclado Alámbrico LTNA	31987	2
Disco duro de 2TB	73354	2
Portarretrato digital	84694	2

Control gaming tipo xbox	79078	2
Teclado Prodigy	98597	2
Mouse óptico inalámbrico 200 negro	44245	5

52

**Tabla 6** (Continuación)

<b>Descripción</b>	<b>SKU</b>	<b>Demanda de los SKU (unidad/día)</b>
Mouse ergonómico vertical	19588	2
Control gaming genérico	61628	4
Teclado legion K200 gaming	92845	2
Pointer inalámbrico Klip	98546	2
Audífono bluetooth	38329	4
Teclado Alámbrico Omen	61892	2
Parlante diseño retro con bluetooth	78679	1
Pointer inalámbrico R5000	36538	2
Micrófono Senngaiser	89634	3
Teclado multimedia	80977	1
Mouse Maxell para gaming	48235	2
Tablet digitalizadora WACOM	71371	2
Micrófono Dinámico unidireccional	87518	2
Mouse óptico retráctil	79471	5
Cámara WEB ECAM	70492	1
Tablet Tab	24605	1
Pointer inalámbrico sencillo	73947	2

Micrófono Omnidireccional	61357	2
Mouse Trackman	41662	3
Micrófono para conferencia	85650	2
Parlante recargable Bluetooth	83232	2
Micrófono Trust GTX	28259	1
Teclado Numérico xtreme abacus	51320	2
Tablet X50F	22246	1
Micrófono Trust	21663	2
Tablet digitalizadora	63543	1
Calculadora científica MS	34412	2
Micrófono inalámbrico con bluetooth	25631	2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Inventario del almacén:** tomando como referencia los datos suministrados por la empresa, se definió el nivel de inventario como se puede ver en la Tabla 7, cabe resaltar que el reabastecimiento de la zona de almacenamiento no se analizará en este proyecto, es decir que siempre habrá productos en la bodega.

**Tabla 7.** Cantidad de artículos almacenados.

<b>SKU</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>INVENTARIO DE LOS SKU (unidad/año)</b>
20768	Memoria USB 32 GB	2587
81600	Mouse inalámbrico ARC Touch	1214
16741	Parlante inalámbrico bluetooth	1171
59692	Audífono de diadema extra Bass	1120
57462	Control gaming tipo PlayStation	1057

41676	Disco duro Adata HD330 de 1TB	1012
65001	Parlante USB SP100	1012
28636	Mouse inalámbrico 3000 negro	982
43825	Memoria USB 16 GB	967
71753	Mouse óptico mini retráctil	954
62299	Mouse inalámbrico gamer	911
53371	Audífono de diadema con micrófono	905
24587	Audífono Maxell Solid con micrófono	879
40005	Cámara IP Inalámbrica	851
60289	Cámara Estabilizadora	766
63880	Calculadora científica SHARP	746
31987	Teclado Alámbrico LTNA	729
73354	Disco duro de 2TB	720
84694	Portarretrato digital	720
79078	Control gaming tipo Xbox	705
98597	Teclado Prodigy	697
44245	Mouse óptico inalámbrico 200 negro	692
19588	Mouse ergonómico vertical	667
61628	Control gaming genérico	629
92845	Teclado legion K200 gaming	621
98546	Pointer inalámbrico Klip	600
38329	Audífono bluetooth	582

<b>SKU</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>INVENTARIO DE LOS SKU (unidad/año)</b>
61892	Teclado Alámbrico Omen	578
78679	Parlante diseño retro con bluetooth	573
36538	Pointer inalámbrico R5000	565
89634	Micrófono Senngaiser	562
80977	Teclado multimedia	553
48235	Mouse Maxell para gaming	527
71371	Tablet digitalizadora WACOM	505
87518	Micrófono Dinámico unidireccional	503
79471	Mouse óptico retráctil	502
70492	Cámara WEB ECAM	493
24605	Tablet Tab	492
73947	Pointer inalámbrico sencillo	490
61357	Micrófono Omnidireccional	475
41662	Mouse Trackman	472
85650	Micrófono para conferencia	430
83232	Parlante recargable Bluetooth	404
28259	Micrófono Trust GTX	401
51320	Teclado Numérico xtreme abacus	391
22246	Tablet X50F	387
21663	Micrófono Trust	372
63543	Tablet digitalizadora	358
34412	Calculadora científica MS	269
25631	Micrófono inalámbrico con bluetooth	6

**Fuente:** Elaboración propia.

**Matriz de distancia:** las distancias entre los nodos origen hasta los nodos destino representan un componente necesario para el desarrollo del modelo, además fueron calculadas teniendo en cuenta la información recolectada anteriormente en la sección 6.1.1, obteniendo como resultado el tipo de política de recolección a utilizar, distancia entre  $\alpha\alpha\alpha\alpha\alpha\alpha$ , número de rack, el ancho y largo de

los pasillos. **6.2.5. Resultados del modelo matemático en el**

### **software GAMS**

Para la investigación el modelo propuesto fue desarrollado en el sistema de modelado para programación matemática y optimización GAMS utilizando el solver

55

CPLEX, el cual fue ejecutado en un computador Intel Core i3 de 2,40 GHz con 4 GB de RAM y un sistema operativo de 64 bits Windows 10.[44]

Se validó el modelo propuesto para un problema de 50 nodos con cuatro picking cart, además En segundo lugar, se presenta los resultados del modelo matemático de las rutas generadas y la distancia mínima para completar el proceso de preparación de pedidos de un día de trabajo.

Una vez realizada la codificación y parametrización en la herramienta que se puede observar en el anexo 5, la duración promedio de ejecución del modelo propuesto para obtener una solución fue de 1.020 segundos, el cual no se realizó ninguna otra operación en el computador para no interrumpir la capacidad de desarrollo.

Por consiguiente, en la Figura 22 el modelo de ruteo de vehículos con flota homogénea donde se consideraron 50 referencia de productos, produce 10.809 variables simples y 10.608 variables discretas.

**Figura 22.** Estadísticas del modelo.

**Fuente:** Elaboración propia.

Después de obtener el número de variables, el resultado del modelo matemático ajustado a las condiciones de la investigación obtenida por el software GAMS determina la realización de 4 rutas con una distancia recorrida mínima de 293,6 metros para completar el proceso de preparación de pedidos.

A continuación, se describe las rutas generadas, y la distancia mínima recorrida por ruta.

**Tabla 8.** Ruta número uno generada por el software GAMS.

VEHÍCULO	RUTA	DISTANCIA (M)
C1	P0-P19-P17-P15-P13-P11-P9-P7-P1-P33-P31-P0	67,4

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 23.** Ruta número uno generada por el software GAMS en el plano de la bodega de

almacenamiento.  
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 9.** Ruta número dos generada por el software GAMS

VEHÍCULO	RUTA	DISTANCIA (M)
C2	P0-P5-P21-P43-P61-P63-P67-P69-P71-P73-P75-P85-P87-P0	83,2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 24.** Ruta número dos generada por el software GAMS en el plano de la bodega de

almacenamiento.  
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 10.** Ruta número tres generada por el software GAMS

VEHÍCULO	RUTA	DISTANCIA (M)
C3	P0-P3-P39-P37-P35-P59-P57-P41-P81-P83-P89-P91-P93-P95- P97-P99-P0	82,2

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 25.** Ruta número tres generada por el software GAMS en el plano de la bodega de

almacenamiento.

**Fuente:** Elaboración propia.

59

**Tabla 11.** Ruta número cuatro generada por el software GAMS

VEHÍCULO	RUTA	DISTANCIA (M)
C4	P0-P25-P27-P29-P55-P53-P51-P49-P47-P45-P79-P77-P65-P0	60,8

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 26.** Ruta número cuatro generada por el software GAMS en el plano de la bodega de almacenamiento.

**Fuente:** Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos, los picking car que dispone la empresa son utilizados en su totalidad; además a cada ruta se asigna un vehículo para cumplir con las ordenes de pedido.

Por otro lado, para analizar el porcentaje de eficiencia de la capacidad de carga en las rutas por cada picking car se presenta la Tabla 12.

**Tabla 12.** Eficiencia de la capacidad de carga del picking car utilizado.

# Ruta	Ruta	Distancia (M)	Cantidad recolectada (unidades)	Capacidad disponible (unidades)	% Total de ocupación
1	P0-P19-P17-P15-P13- P11-P9-P7-P1-P33- P31-P0	67,4	26	30	86.7%
2	P0-P5-P21-P43-P61-P63-P67-P69-P71-P73- P75-P85-P87-P0	83,2	26	30	86.7%

3	P0-P3-P39-P37-P35- P59-P57-P41-P81- P83- P89-P91-P93- P95-P97- P99-P0	82,2	30	30	100%
4	P0-P25-P27-P29- P55- P53-P51-P49- P47-P45- P79-P77- P65-P0	60,8	28	30	93.3%

**Fuente:** Elaboración propia

Observando la Tabla 12, se puede concluir que el mayor porcentaje de utilización de la capacidad de carga del vehículo se obtiene en las rutas 3 y 4 y la menor ocupación en las rutas 1 y 2, además con estos resultados se hace evidente que la capacidad de los vehículos se adapta a la demanda de los clientes que pueden ser recolectados.

Ahora bien, analizando los resultados obtenidos por medio de la herramienta, se debe utilizar la política de recolección en forma de S y con retorno, es decir el operario entra a un pasillo con al menos un ítem que necesita ser recolectado, lo atraviesa totalmente si es necesario como se observa en la Figura 27, en caso contrario debe salir y entrar por el mismo extremo del pasillo, luego entra al siguiente que contenga al menos un ítem que deba ser recogido (ver Figura 28), así consecutivamente hasta que termina con su lista de pedidos.

**Figura 27.** Política transversal en forma de S.

**Fuente:** Extraído de K. J. Roodbergen, G. P. Sharp, and I. F. A. Vis, 2012.

[20]

**Figura 28.** Picking Con Retorno.

**Fuente:** Extraído de N. Purdy, 2012. [21]

A partir de los recursos utilizados y los resultados del modelo matemático del software GAMS anteriormente realizados en la sección 6.2.5, son utilizados para la validación de la simulación de eventos discretos. Aprovechando el potencial de la simulación, los resultados del enfoque desarrollado se evalúan con base en cinco indicadores: i) distancia recorrida en la zona de alistamiento (Ec. 5), ii) throughput como la tasa de salida de las cajas por unidad de tiempo (Ec. 6), iii) Tiempo total de picking (Ec. 7), iv) ocupación del recolector (%) (Ec. 8), y v) productividad (Ec. 9).

**Distancia total recorrida**

$$D_{total} = D_{al} + D_{re} + D_{tr} \quad (Ec. 5) \text{ Donde:}$$

$$D_{al} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D_{ij} \cdot X_{ij} \quad [Ec. 6]$$

$$x_{i+1} = x_i + h \cdot f(x_i, t_i); \quad x_0, t_0 = 0, \dots, t_{\text{fin}}[h]$$

$$x_{i+1} = x_i + h \cdot f(x_i, t_i) \quad [h]$$

$$x_{i+1} = x_i + h \cdot f(x_i, t_i) \quad [h]$$

**Tasa de salida de cajas (Throughput)**

$$x_{i+1} h + x_i h = x_{i+1} h$$

$$x_{i+1} + x_i (2.6) \text{ Donde:}$$

$$x_{i+1} h + x_i h = x_{i+1} h$$

$$[x_{i+1} h + x_i h]$$

$$[x_{i+1} h + x_i h]$$

$$x_{i+1} = x_i + h \cdot f(x_i, t_i)$$

$$x_{i+1} h + x_i h = x_{i+1} h \quad [x_{i+1} h + x_i h]$$

$$x_{i+1} = x_i + h \cdot f(x_i, t_i) \quad \text{ó} \quad [h]$$

$$x_{i+1} = x_i + h \cdot f(x_i, t_i)$$

$$x_{i+1} h + x_i h = x_{i+1} h \quad [h]$$

**Tiempo total de picking**

$$x_{i+1} h + x_i h = x_{i+1} h$$

$$x_{i+1} h + x_i h (2.7) \text{ Donde:}$$

$$x_{i+1} h + x_i h = x_{i+1} h$$

$$[x_{i+1} h + x_i h]$$

$$x_{i+1} h + x_i h = x_{i+1} h; \quad x_0, t_0 = 0, \dots, t_{\text{fin}}[h]$$

$$x_{i+1} h + x_i h = x_{i+1} h$$

$$x_{i+1} h + x_i h = x_{i+1} h \quad \text{hí} \quad [x_{i+1} h + x_i h]$$

$$x_{i+1} h + x_i h; \quad x_0, t_0: 0 [h]$$

**Ocupación del recolector (%)**

$$\% \quad x_{i+1} h + x_i h = x_{i+1} h$$

$$x_{i+1} h + x_i h (2.8) \text{ Donde:}$$

$$x_{i+1} h + x_i h = x_{i+1} h \quad [x_{i+1} h + x_i h]$$

$$x_{i+1} h + x_i h = x_{i+1} h \quad [h]$$



de la modelación. La primera fase muestra la estructura de la modelación

64

matemática del sistema y la segunda fase la de la simulación. Esta estructura también puede ser vista como una función  $F(X) = Y$ , donde "X" es el conjunto de parámetros input, "F" el modelo combinado, y "Y" el conjunto de indicadores output.

### **6.3. Metodología para la construcción de un modelo de simulación.**

La simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso, conducir experimentos con el propósito de entender el comportamiento del sistema y/o evaluar nuevas estrategias con las cuales se puede operar el sistema. [51]

J.Banks [52], propone una metodología de construcción de un Modelo de Simulación, donde los pasos a seguir en un estudio de simulación según lo que este autor plantea son:

1. Definición del Sistema: es la descripción del problema, sus características principales, alcance y aéreas involucradas, definiéndose fronteras para la simulación, restricciones y medidas de efectividad que se usarán.
2. Formulación del modelo: elaboración de un diagrama de flujo lógico del proceso.
3. Preparación de datos: Identificación de los datos requeridos para el modelo y elección adecuada para una reducción objetiva de ellos.
4. Selección del lenguaje de Simulación: en este caso el software de simulación Flexsim.
5. Translación del modelo: generación de los códigos computacionales para lograr que el modelo sea ejecutado.
6. Validación del modelo: determinación de la confiabilidad que tiene el modelo para representar la realidad, haciendo comparaciones a través del uso de resultados históricos con sus datos, aplicándolos al modelo.
7. Planeación Estratégica: diseño de un experimento que producirá la información deseada.
8. Planeación Táctica: determinación de cómo se realizará cada una de las corridas de prueba.
9. Experimentación: corrida de la simulación para obtener datos y efectuar análisis de sensibilidad.
10. Interpretación: obtención de inferencias con base en datos generados por la simulación.
11. Implantación: selección de la mejor alternativa para llevarla a la práctica,

teniendo cuidado con las suposiciones que se hicieron al iniciar el proceso de simulación.

12. Monitoreo y Control: modificaciones del modelo dependiendo de la reacción del proceso al ser implementado y los resultados esperados, de modo que el modelo sea realmente una representación del sistema.

Esta metodología se ve representada en la Figura 30.

**Figura 30.** Metodología para la construcción de un modelo de simulación.  
**Fuente:** Elaboración propia.

Considerando que se va a evaluar la distancia total recorrida para completar el proceso de preparación de pedidos, se utilizan los mismos datos del estudio realizado en el software GAMS, ver la sección 6.2.4.

### 6.3.2. Programación del modelo de simulación.

Inicialmente se importa el plano de AutoCAD versión 2020 a el software Flexsim versión 20.2.3, para utilizarlo como base para ubicar los objetos del software que van a representar los elementos que conforman el CEDI. En el siguiente cuadro se describe los objetos del software Flexsim y su relación con el proceso de preparación de pedidos.

**Tabla 13.** Descripción de los elementos utilizados del software Flexsim.

Icono	Elementos	Cantidad	Representación en el modelo	Descripción
	Rack	62	Almacenamiento de los productos.	El Rack es usado como un objeto de almacenamiento de productos.
	Queue	4	Recepción de cajas con los pedidos.	Se utiliza como recepción de las cajas de los pedidos sustraídas de los racks, que posteriormente serán movidas por un operario.
	Combiner	2	Alistamiento de pedido. (etiquetado y sellado)	El combinador se utiliza para agrupar varios elementos permitiendo así el alistamiento de los pedidos.
	conveyor belt	1	Banda transportadora que se llevará las cajas al muelle de despacho	Se emplea para mover productos por un camino definido.

**Tabla 13.** (Continuación)

Icono	Elementos	Cantidad	Representación en el modelo	Descripción
-------	-----------	----------	-----------------------------	-------------

	Dispatcher	1	Controla un grupo de operadores	Se utiliza para moderar un grupo de operadores en una actividad específica.
	A*Navigator	1	Ruta de los operarios	Se usan para definir el camino que seguirá un transporte cuando realiza tareas de viajes
	Picking cart	4	Trasporte interno del almacén	Está diseñado para mover productos desde un objeto a otro.

**Fuente:** Extraído del Manual de Flexsim, 2020. [53]

### 6.3.3. Descripción de la operación:

A continuación, se realiza la descripción de operaciones realizadas dentro del CEDI y que impactan directamente el cumplimiento de las entregas a los clientes.

Las listas de picking son generadas de acuerdo al pasillo y nivel de la estantería, esto con la intención de hacer la recolección de varios pedidos al mismo tiempo, sin tener que dirigirse a la misma ubicación varias veces, por consiguiente, los picking cart son cargados agrupando la mercancía por código.

El jefe de bodega asigna las listas a los auxiliares realizando la recolección con un picking cart y se dirige a la primera ubicación que le indique la lista de picking, verificando que el código solicitado coincide con la unidad de almacenamiento existente y toma la cantidad de cajas indicada, finalmente se dirige a la siguiente

pasillo, se dirige al siguiente hasta que termina el listado asignado.

Una vez que cada auxiliar termina con su lista de picking, ubican la mercancía recolectada en la zona de alistamiento identificada anteriormente en la sección 6.1.1. Posteriormente cada auxiliar se dirige hacia el jefe de bodega para asignación de una nueva lista de picking.

Un auxiliar de la zona de alistamiento arma las cajas para empacar el producto, se imprime una etiqueta con los códigos y la cantidad que contiene, además se realiza la clasificación de las cajas según su destino. Finalmente, se sella las cajas a la banda transportadora para que sean llevadas a los muelles de carga.

En las Figura 31 se muestra el flujo de las operaciones a grandes rasgos, que se describió anteriormente.

**Figura 31.** Flujo del proceso de picking.  
**Fuente:** Elaboración propia.

#### **6.3.4. Process Flow:**

Inicialmente, Flexsim solo permitía construir modelos de simulación de forma

tradicional, los cuales se debían programar mediante el lenguaje de C++ para realizar funciones específicas. Sin embargo, desde 2016, el fabricante de software creó una función denominada Process Flow o Flujo de procesos. El cual usa bloques de actividades pre elaboradas para construir lógicas básicas o complejas en un ambiente familiar de esquema de flujo. Esto mantiene la lógica y se ajusta a cualquier modelo a medida que cambia. Es particularmente útil para construir modelos complejos, permitiendo reducir significativamente el tiempo de creación pasando de unos pocos días a minutos.

El diseño del modelo de simulación para el proceso de preparación de pedidos, se desarrolla en su mayoría utilizando el process flow, el cual se divide en dos categorías principales, el primero es el proceso de inventario inicial, el segundo permite la generación de pedidos basados en los datos históricos, la asignación de la lista de pedidos a los operarios, la recolección de los pedidos y por último el alistamiento y envío de los pedidos.

### **Inventario inicial**

El modelo creado incluye una tabla global de inventario inicial. Esta primera sección del flujo de proceso lee esta tabla y luego crea los artículos con su respectiva etiqueta, estos son almacenados en los racks según la clasificación ABC realizada antes en la sección 6.1.2. Para esto los datos de entrada son los códigos de las 50 referencias que maneja el CEDI. Esta lógica fue creada con base en el esquema de direcciones definido en el sistema de almacenamiento y utiliza el direccionamiento directo para obtener el rack correspondiente (ver figura 32).

**Figura 32.** Flujo de procesos para la ubicación y etiquetado de las unidades en los racks del almacén.

**Fuente:** Elaboración propia.

### **Generación de pedidos, asignación de los operarios, recolección de los pedidos y envío de los pedidos.**

En la mayoría de las simulaciones de almacén, la generación de pedidos puede realizarse de dos formas. En primer lugar, puede usar distribuciones de probabilidad aleatorias para generar órdenes basadas en métricas generales de rendimiento. En segundo lugar y el cual se utiliza para este caso de estudio, la generación de pedidos puede basarse en datos históricos analizados antes en la sección 6.2.4 o listas de pedidos.

El process flow o flujo del proceso que se visualiza en la Figura 33, permite asignar las listas de pedidos a los recolectores, usando como datos de entrada corresponden a la demanda de los clientes. También permite la recolección de los artículos almacenados, previa verificación del SKU en la posición de destino. Una vez localizado el artículo, se le da salida del sistema. Finalmente, se clasifica, se consolida el pedido y se envía.

**Figura 33.** Flujograma para la generación y recolección de pedidos basados en los datos históricos.

**Fuente:** Elaboración propia.

Inicialmente, se utilizaron los resultados del modelo matemático para validar el modelo de simulación para los 50 nodos (posiciones  $P_i$ ), utilizando los cuatro vehículos de recolección, como parte del escenario cero, el cual, entregó no sólo el valor de la distancia total recorrida, sino también los otros indicadores de desempeño logístico del CEDI: productividad, throughput, tiempo total de picking, y ocupación porcentual del recolector. Esta es la primera contribución de este trabajo, resultante de la combinación de los dos enfoques. Luego, con base en dos parámetros sensibles de mejora se definieron escenarios, a partir del mapa del problema mostrado en la Figura 34. Los parámetros de entrada o  $X_s$  son: capacidad

**Figura 34.** Mapa del problema para la modelación con simulación. **Fuente:** Elaboración propia.

#### **6.3.5. Resultados del modelo de simulación generado a partir del modelo matemático.**

Luego de definir el proceso de simulación, los recursos y los parámetros, se realizó la construcción del modelo de simulación como se visualiza en la Figura 35.

**Zona de  
Almacenamiento**

**Zona de  
Alistamiento**

**Figura 35.** Modelo de simulación generado a partir del modelo matemático.

**Fuente:** Elaboración propia.

Los resultados de la simulación, se muestran en un dashboard o tablero en donde se muestra en tiempo real el comportamiento del modelo de simulación; aquí se insertan 4 cuadros: i) distancia recorrida en la zona de alistamiento (Ec. 5), ii) throughput como la tasa de salida de las cajas por unidad de tiempo (Ec. 6), iii) Tiempo total de picking (Ec. 7) y iv) ocupación del recolector (%) (Ec. 8).

Los resultados se observan en la Figura 36.

**Figura 36.** Resultados del modelo de simulación de la distribución a partir del modelo matemático.

**Fuente:** Elaboración propia.

#### **6.3.5.1. Interpretación de los resultados arrojados a partir**

#### **del modelo matemático**

Al analizar los resultados de la Figura 36 se puede observar en el recuadro 1 el throughput que es medido como la tasa de salida de las cajas por unidad de tiempo, al utilizar la ecuación 6 el resultado es 74 cajas cada 1.915 segundos.

En el recuadro 2 muestra la distancia recorrida por cada uno de los operarios, aplicando la ecuación 5 resulta 293,6 metros recorridos.

Al observar el recuadro 3 y al emplear la ecuación 7, el tiempo que tarda cada picking cart en el proceso de recolección de pedidos es de 1.915 segundos.

Finalmente, en el recuadro 4 se presentan los porcentajes de ocupación de los 4 operarios que conducen los picking cart; usando la ecuación 8 se tiene que, el picker 1 tiene un porcentaje de ocupación del 34,54%, el picker 2 un 29,46% de ocupación, el picker 3 trabajó sólo un 35,52% del tiempo total de operación y el picker 4 solo se ocupa un 33,63%.

Con estos datos como base, se puede saber cuál es el comportamiento de la distancia y tiempo de recolección de los pedidos, la tasa de salida de las cajas y finalmente el porcentaje de ocupación de los operarios; por lo que se plantean tres

posibles escenarios de mejora en el CEDI.

### **6.3.6. Evaluación de tres escenarios de mejora**

#### **6.3.6.1. Evaluación del primer escenario**

En la primera alternativa, se aumenta la capacidad de picking cart de 30 a 40 unidades. El modelo de simulación de la alternativa 1 queda de la siguiente manera (ver Figura 37).

**Aumentar la  
capacidad del  
picking cart de  
30 a 40  
unidades**

**Figura 37.** Simulación del primer escenario.

**Fuente:** Elaboración propia.

#### **Interpretación de los resultados del primer escenario**

Se recorre una distancia total de 196,4 metros por los recolectores. El throughput es de 86 cajas cada 2.226 segundos. El tiempo total de picking es de 2.226 segundos. La ocupación de los recolectores es de 76,47%. La productividad para este escenario es de 10 cajas por minuto.

#### **6.3.6.2. Evaluación del segundo escenario**

En la segunda alternativa, se aumenta la capacidad de picking cart de 4 a 6 picking carts. El modelo de simulación de la alternativa 2 queda de la siguiente manera (ver

Figura 38).

**Aumentar de 4 a 6  
picking carts**

**Figura 38.** Simulación del segundo

escenario.

**Fuente:** Elaboración propia.

### **Interpretación de los resultados del segundo escenario**

Distancia total recorrida, 279,68 metros. Se obtuvo un throughput de 84 cajas cada 2.174 segundos. El tiempo total de picking es de 2.174. El promedio de ocupación de los recolectores es de 70,80%. La productividad es de 10 cajas por minuto.

79

### **6.3.6.3. Evaluación del tercer escenario**

En la tercera alternativa, se aumenta la capacidad de picking cart de 30 a 40 y el número picking carts de 4 a 6. El modelo de simulación de la alternativa 3 queda de la siguiente manera. (Ver gráfica 39).

**Aumentar ambos  
parámetros  
simultáneamente**

**Figura 39.** Simulación del tercer escenario.  
**Fuente:** Elaboración propia.

**Interpretación de los resultados del**

**escenario tres**

Distancia total recorrida, 245.66 metros. Se obtuvo un throughput de 80 cajas cada 2.071 segundos. El tiempo total de picking es 2.071. El promedio de ocupación de los recolectores es 80,10%. La productividad es 10 cajas por minuto.

## **7. Discusión de resultados**

A continuación, se hace un análisis sobre el impacto que tiene cada una de las propuestas de mejora a partir de los resultados obtenidos. Se presentaron tres escenarios de mejora: La primera propuesta es aumentar la capacidad del picking cart, la segunda es aumentar el número de picking cart y finalmente el tercer escenario se aumentan ambos parámetros simultáneamente.