

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE PRODUCTOS EN
CENTROS DE ALMACENAMIENTO CROSS DOCKING**

VIVIANA MAYURI DÍAZ PULLI

SANDRA LORENA RODRÍGUEZ RENGIFO



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI**

2013

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA UBICACIÓN DE PRODUCTOS EN
CENTROS DE ALMACENAMIENTO CROSS DOCKING**

**VIVIANA MAYURI DÍAZ PULLI
SANDRA LORENA RODRÍGUEZ RENGIFO**

**Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Industrial**

**Director
Msc. Juan Pablo Orejuela Cabrera
Universidad del Valle**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI
2013**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Director

MSc. Juan Pablo Orejuela

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, Agosto de 2013

DEDICATORIA

A Dios,
Por mostrarnos día a día que con humildad, paciencia y sabiduría, todo es posible.

A mis padres,
Por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles,
y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar.
Ellos me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios,
mi carácter, mi empeño, mi perseverancia y mi coraje para conseguir mis objetivos.

A mis hermanos,
Por estar siempre presentes, acompañándome durante este largo camino.

A mi novio, amigo y compañero
Por su amor, apoyo y comprensión incondicional.

Viviana Mayuri.

A Dios,
Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr
mis objetivos, además por su infinita bondad y amor.

A mis padres Gloria Rengifo y Dagoberto Rodríguez,
A quienes agradezco todo lo que fui, todo lo que soy y todo lo que llegare a ser.

A mi abuelita Alba María Sabogal,
Por quererme y estar siempre cuando la necesito, esto también se lo debo a ella.

A mis hermanos Luis y Lina,
Por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

A Albita, Tito y Paulita,
Por su aprecio y su ayuda en las buenas y en las malas.

A mi amiga y compañera de tesis Mayuri,
Que sin importar el tiempo que nos conocemos, nuestra amistad se ha fortalecido.
Por todo lo que compartimos y compartiremos, Gracias.

Sandra Lorena.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer sinceramente a Dios por darnos fortaleza y permitirnos terminar satisfactoriamente este trabajo.

También queremos agradecer infinitamente a nuestro director de trabajo de grado, el profesor Juan Pablo Orejuela, por confiar en nosotras, guiarnos y regalarnos parte de su tiempo.

A nuestros compañeros y amigos por estar ahí cuando los necesitábamos.

Y a todas aquellas personas que contribuyeron de una u otra manera a la realización de este trabajo.

¡Infinitas Gracias!

Tabla de Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	12
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
3. OBJETIVOS.....	16
3.1. OBJETIVO GENERAL	16
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4. CENTROS DE ALMACENAMIENTO TRADICIONALES.....	17
4.2. OBJETIVO DE LOS CENTROS DE ALMACENAMIENTO	17
4.3. CLASIFICACIÓN DE LOS CENTROS DE ALMACENAMIENTO	18
4.3.1. Según su relación con el flujo de producción	19
4.3.2. Según su ubicación.....	19
4.3.3. Según el material a almacenar.....	20
4.3.4. Según su grado de mecanización	20
4.3.5. Según su localización.....	21
4.3.6. Según su función logística.....	21
4.4. PRINCIPALES OPERACIONES DENTRO DE UN CENTRO DE ALMACENAMIENTO	22
4.4.1. Operaciones de Recepción	23
4.4.2. Operaciones de Almacenamiento.....	23
4.4.3. Recolección de ordenes (picking)	24
4.4.4. Operaciones de embalaje.....	24
4.4.5. Operaciones de despacho	25
4.5. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO.....	26
4.5.1. Almacenamiento de piso	26
4.5.2. Almacenamiento volumétrico (En bloque)	26
4.5.3. Anaqueles y estantería estáticos.....	26
4.5.4. Contenedores flexibles	26
4.5.5. Cajas o Cajones	27
4.5.6. Carga unitaria	27
4.6. MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO.....	27
4.6.1. Almacenamiento Dedicado	28
4.6.2. Almacenamiento Compartido.....	29
4.6.3. Almacenamiento Aleatorio.....	29
4.6.4. Almacenamiento Abierto.....	30
4.6.5. Almacenamiento por Volumen de Ventas	30
4.6.6. Almacenamiento basado en Clases.....	31

4.6.7.	Almacenamiento por Agrupación de Familias.....	32
5.	CENTROS DE ALMACENAMIENTO CROSS DOCKING.....	38
5.1.	¿QUÉ ES EL CROSS-DOCKING?	38
5.2.	BENEFICIOS DEL CROSS DOCKING.....	38
5.3.	CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS CROSS DOCKING.....	39
5.3.1.	Cross Docking para justo a tiempo.....	39
5.3.2.	Cross Docking para distribución	39
5.3.3.	Terminales Cross Docking	39
5.4.	OTRA CLASIFICACIÓN	40
5.4.1.	Pre- distribución Cross Docking (Pre-C)	40
5.4.2.	Post- distribución Cross Docking (Post-C).....	41
5.5.	CARACTERÍSTICAS DE LOS CENTROS CROSS DOCKING	41
5.5.1.	Características físicas.....	41
5.5.2.	Características operacionales.....	44
5.5.3.	Características del Flujo	45
5.6.	OPERACIONES EN LOS CENTROS CROSS DOCKING.....	47
5.6.1.	Recepción	47
5.6.2.	Almacenamiento	47
5.6.3.	Clasificación de los pedidos	48
5.6.4.	Picking	48
5.6.5.	Envío	48
5.7	IDENTIFICACIÓN DE TIPOS DE PRODUCTOS A MANEJAR BAJO UNA ESTRATEGIA DE CROSS DOCKING	49
6.	UBICACIÓN DE PRODUCTOS EN CENTROS CROSS DOCKING	51
7.	CRITERIOS UTILIZADOS EN LOS MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO PARA LA UBICACIÓN DE PRODUCTOS EN CENTROS CROSS DOCKING.....	60
8.	PROPUESTA METODOLÓGICA	63
8.1.	METODOLOGÍA PROPUESTA.....	63
8.2.	FORMULACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE ASIGNACIÓN DE LUGARES DE ALMACENAMIENTO A UNIDADES DE CARGA DE PRODUCTOS EN CENTROS CROSS-DOCKING.	64
8.3.	NOTACIÓN Y DEFINICIÓN.....	66
8.4.	FORMULACIÓN VERBAL DEL MODELO.....	69
9.	APLICACIÓN DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA AL CASO DE ESTUDIO	81
9.1.	DATOS	82
9.1.1.	LA TERMINAL.....	82
9.1.2.	Las Distancias.....	83
9.1.3.	Camiones de llegada y salida.....	84

9.1.4.	<i>Costos de Transporte y Almacenamiento temporal.....</i>	<i>85</i>
		86
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	87
10.1.	IMPLEMENTACIÓN	87
10.2.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	91
11.	CONCLUSIONES	102
12.	ESTUDIOS FUTUROS.....	105
13.	BIBLIOGRAFÍA	106

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Distribución normal de un centro Cross Docking	15
Ilustración 2. Típica Terminal Cross Docking	40
Ilustración 3. Formas de terminales Cross Docking.....	42
Ilustración 4. Flujos típicos de los productos en una bodega.....	53
Ilustración 5. Metodología desarrollada para la asignación de lugares de almacenamiento a unidades de carga de productos.	64
Ilustración 6. Diseño del centro Cross Docking - Caso de estudio	86
Ilustración 7. Variación costo de transporte vs variación Costo F.O	93
Ilustración 8. Variación positiva del costo de mantener inventario vs la variación del costo de la F.O	95
Ilustración 9. Valor Función Objetivo vs Variación número de Productos	98

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de los métodos de almacenamiento -a.	34
Tabla 2. Caracterización de métodos de almacenamiento -b.....	35
Tabla 3. Caracterización de los métodos de almacenamiento -c.	36
Tabla 4. Métodos de ubicación de bienes en ambientes Cross Docking	59
Tabla 5. Características de la terminal Cross Docking.	82
Tabla 6. Distancias desde la puerta de descarga d hasta el lugar de almacenamiento a (m).83	
Tabla 7. Distancias desde el lugar de almacenamiento a hasta la puerta de carga c (m). . 83	
Tabla 8. Cantidad de producto p que llega por la puerta de descarga d.	84
Tabla 9. Cantidad de producto p que sale por la puerta de carga c.....	84
Tabla 10. Costos de almacenar el producto p en el lugar de almacenamiento a ($\$/unidad de$ carga)	85
Tabla 11. Costo de transportar una unidad de carga por metro de recorrido para cada producto p ($\$/unidad de carga$).....	85
Tabla 12. Resultados de la variable de asignación.....	88
Tabla 13. Cantidad transportada del producto p hacia los lugares de almacenamiento a.89	
Tabla 14. Cantidad transportada del producto p desde el lugar de almacenamiento a hasta la puerta de carga c.	90
Tabla 15. Variación positiva de los costos de transporte del producto p.....	91
Tabla 16. Resultados de la variación del costo de transporte	92
Tabla 17. Variación positiva del costo de mantener inventario para las localizaciones tipo 1.	94
Tabla 18. Variación positiva del costo de mantener inventario para las localizaciones tipo 2.	94
Tabla 19. Resultados de la variación del costo de mantener el inventario	94
Tabla 20. Resultados del modelo con ocho (8) localizaciones	96
Tabla 21. Resultados del modelo con nueve (9) localizaciones	96

Tabla 22. Resultados del modelo con diez (10) localizaciones	97
Tabla 23. Costos de uso de cada lugar de almacenamiento a.	99
Tabla 24. Resultados del la variable asignación de los productos.....	100
Tabla 25. Resultados la frecuencia de asignación de los lugares a.....	101

1. INTRODUCCIÓN

Es muy común que las compañías busquen mejorar el desempeño en cada eslabón de su cadena de suministro debido al ambiente globalizado y competitivo en el que se encuentran, en esta búsqueda las compañías pueden llegar a desarrollar ventajas sobre sus competidores, enfocando sus esfuerzos principalmente en la disminución de tiempo, costos y garantizando una mejor calidad de sus servicios. (Vis & Roodbergen, 2008)

Actualmente se está realizando un gran esfuerzo en hacer las operaciones más eficientes. Se busca reducir costos, mediante la reducción de inventario en cada paso de la operación incluida la distribución. Además los clientes están demandando mejores servicios, que se traducen en una entrega precisa y oportuna de los productos (Vis & Roodbergen, 2008).

En este sentido, una estrategia innovadora que ayuda a disminuir el inventario, acelerando el flujo de los productos por medio de la recepción, movimiento y despacho casi inmediato a través de los centros de distribución es el Cross Docking, además esta estrategia tiene un gran potencial para el control y la distribución de los costos de logística, mientras que simultáneamente eleva el nivel de servicio al cliente (Apte & Viswanathan, 2000).

Investigaciones afines con este tema se enfocan principalmente en aspectos estratégicos (Boysen N. , 2010), sin embargo, recientemente se han publicado estudios que tratan los problemas relacionados con las decisiones que se deben tomar en el corto plazo; es decir a nivel operativo; estos problemas son la programación de las operaciones, el transbordo, la asignación de las puertas en los muelles, el ruteo de vehículos y la ubicación de productos en el centro de almacenamiento (Agustina, Lee, & Piplani, 2010).

Dentro de los problemas planteados anteriormente se encuentra el tema de investigación de este proyecto, el cual corresponde a la ubicación de productos en un centro Cross Docking.

En la actualidad existen numerosas maneras de asignar los productos a los lugares de almacenamiento en bodegas tradicionales, entre ellas se encuentran la política de almacenamiento aleatorio, dedicado, por familias y políticas que toman en cuenta el volumen de ventas de los productos. Sin embargo, estos métodos no son muy eficientes en centros Cross Docking debido a la diferencia que presentan estos centros comparados con los centros tradicionales.

Entre estas diferencias tenemos que en las bodegas tradicionales los productos son almacenados por largos periodos de tiempo, contrario a los centros Cross Docking, donde los productos llegan y son despachados en un tiempo mínimo aproximado de un día. (Vis & Roodbergen, 2008)

Para dar respuesta a los requerimientos de los centros Cross Docking y teniendo en cuenta que muchas empresas están optando por implementar este concepto, se planteó como tema de investigación el desarrollo de una estrategia que involucrara los criterios relacionados con la ubicación de bienes en estos ambientes.

En este trabajo se presenta una caracterización de los centros de almacenamiento tradicionales y Cross Docking, donde se identifican las variables y atributos de dichos centros de almacenamiento.

Posteriormente se realiza una integración de criterios, teniendo en cuenta los más convenientes para los centros Cross Docking y se desarrolla una estrategia para la ubicación de productos en centros Cross Docking.

Finalmente se presenta el caso de estudio y se realiza la aplicación de la estrategia a este caso, terminando con el análisis y las conclusiones.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es importante para cualquier compañía mantener un nivel alto de competitividad en el mercado y una forma de hacerlo es asegurar que a lo largo de su cadena de suministro todos los procesos y operaciones se realicen con un nivel de eficiencia y efectividad adecuado a sus objetivos. En este sentido, las operaciones logísticas se han convertido en un foco importante para que las compañías alcancen sus objetivos relacionados con el nivel de servicio al cliente, ofrecido a un costo razonable (Shaffer, 1997).

Una forma de garantizar lo expuesto anteriormente es el uso de los centros Cross Docking los cuales son sistemas que permiten acelerar el flujo de productos por medio de la recepción, movimiento y despacho casi inmediato a través de los centros de almacenamiento (Galbreth & Hill, 2008). Debido a esto, estos sistemas se encuentran en una constante presión ya que buscan reducir inventarios, los costos asociados a estos, los plazos de entrega, las distancias recorridas por cada uno de los productos y la corta permanencia de los productos en el centro.

En este sistema la eficiencia y efectividad se encuentran inversamente relacionadas con el tiempo que permanece un producto en el interior del centro (Apte & Viswanathan, 2000), el tiempo para cada producto, comienza a contar desde el momento que llega en un camión de entrada y termina cuando dicha unidad abandona la terminal en un camión de salida.

Según (Vidal, 2010) en un centro de distribución el tiempo promedio que se consume en las actividades de recolección de ordenes corresponde aproximadamente en un 60% al desplazamiento, 25% extracción de los productos, 10% búsqueda y 5% asociado a otras tareas.

Por lo tanto, para eliminar actividades que no agregan valor a las operaciones, se pueden implementar varias estrategias, una de ellas es la que se pretende realizar en este proyecto de grado, la cual consiste en desarrollar una herramienta que permita la asignación de lugares de

almacenamiento a productos en centros Cross Docking, logrando mediante esta herramienta una reducción importante del tiempo de búsqueda de los productos y del tiempo asociado al desplazamiento del recolector.

Además es de considerar el hecho que las etapas de almacenamiento intermedio y consolidación de cargas, son etapas que ofrecen un gran potencial de mejoramiento y ahorro para las compañías (Shaffer, 1997).

El problema consiste en donde ubicar un producto que acaba de ser descargado en el centro de almacenamiento Cross Docking (ver Ilustración 1), considerando algunos criterios que se han identificado dentro de la revisión bibliográfica, desde el punto de vista de la eficiencia y la rapidez con que se entregan los productos al consumidor final.

Siguiendo esta línea, se ha planteado como pregunta de investigación la siguiente:

¿En qué lugar se debe almacenar temporalmente un producto que acaba de ser descargado dentro de un centro Cross Docking?

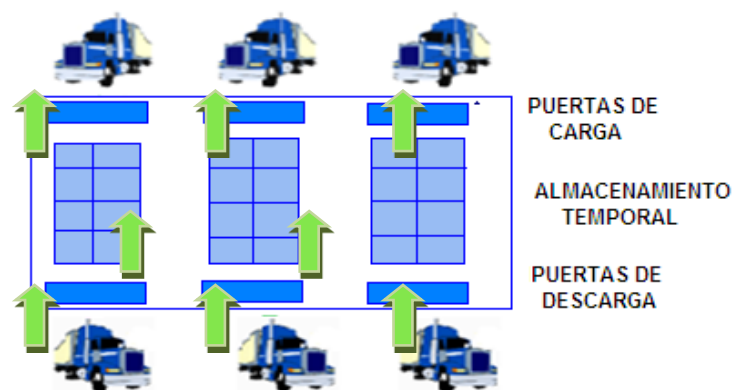


Ilustración 1. Distribución normal de un centro Cross Docking
[Fuente: Elaboración propia]

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta que busque la ubicación de bienes en un centro Cross- Docking con el propósito de mejorar su eficiencia.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar mediante la revisión bibliográfica los diferentes métodos de ubicación de bienes en centros de almacenamiento con el propósito de identificar las variables y atributos de los mismos.
- Integrar los criterios generales planteados para centros de almacenamiento en la ubicación de bienes en centros Cross Docking con el fin de identificar sus posibles impactos.
- Aplicar a un caso de estudio la estrategia propuesta con el propósito de validar e identificar sus posibles beneficios.

4. CENTROS DE ALMACENAMIENTO TRADICIONALES

Para dar cumplimiento al primer objetivo, presentamos en este capítulo los elementos más importantes de los centros de almacenamiento tradicionales ya que parte estos elementos contribuirán al desarrollo de la estrategia metodológica.

4.1. DEFINICIÓN

Un centro de distribución se puede definir como un lugar físico donde una o varias empresas almacenan diferentes tipos de mercancías o materias primas, ya sean fabricadas por ellas o adquiridas a un tercero. En estos espacios se manejan dimensiones que pueden ir desde muy grandes (pallets con mercancía) hasta unidades sueltas. Normalmente los centros de distribución no se encuentran en las propias instalaciones de la empresa, sino fuera de ellas, en áreas de fácil acceso y preferiblemente cerca de autopistas, aeropuertos o puertos; ya que esto facilita un rápido recibo y despacho de la mercancía que administran. Los centros de distribución cumplen funciones no sólo de depósito de mercancías, sino también sirven como agentes aduaneros. Así mismo, realizan operaciones productivas en su interior como, por ejemplo, procesos de reempaque. (Frazelle, 2002)

4.2. OBJETIVO DE LOS CENTROS DE ALMACENAMIENTO

Algunas razones importantes para tener centros de distribución se nombran a continuación:

- a. **Mejorar el servicio al cliente:** Al disponer de un inventario de productos permitiendo reducir los tiempos de respuesta al cliente, ya que hay más cercanía al mismo, esto indudablemente puede tener un impacto positivo en las ventas (Vidal, 2010).
- b. **Coordinar el suministro y la demanda:** Por más estable que sea la demanda de un producto, siempre existirán desfases entre la producción (o compra) y la demanda. Coordinar muchos productos desde diversos orígenes (plantas, proveedores) hacia diversos

destinos (detallistas, clientes) puede ser extremadamente difícil si no existe de por medio un sistema de almacenamiento (Vidal, 2010).

- c. **Reducir los costos de producción:** Lograr reducir los costos de compra y transporte es otra de las razones por las cuales se decide almacenar. Así por ejemplo, puede resultar más rentable realizar aprovisionamientos de productos en grandes cantidades para aprovechar los descuentos en compra y así reducir los precios, esto a pesar de necesitar mayor espacio para su almacenamiento (Herrera, 2007).
- d. **Optimizar el desempeño logístico:** La implementación de centros de distribución dentro de la cadena de suministro surge de la necesidad de generar mecanismos que permitan lograr una distribución más eficiente, flexible y dinámica, asegurando una amplia capacidad de respuesta a los requerimientos del cliente (Mina, 2007).

4.3. CLASIFICACIÓN DE LOS CENTROS DE ALMACENAMIENTO

Cada almacén es diferente de cualquier otro. Por ello es necesario establecer mecanismos para clasificar los almacenes. Algunos de los parámetros que plantea (García, 2007) son:

1. Según su relación con el flujo de producción
2. Según su ubicación
3. Según el material a almacenar
4. Según su grado de mecanización
5. Según su localización
6. Según su función logística

4.3.1. Según su relación con el flujo de producción

Se pueden clasificar los almacenes según su relación con el flujo de producción en los siguientes grupos:

- **Almacenes de Materias Primas:** Aquellos que contiene materiales, suministros, envases, etc.; que serán posteriormente utilizados en el proceso de transformación.
- **Almacenes de Productos Intermedios:** Aquellos que sirven de colchón entre las distintas fases de obtención de un producto.
- **Almacenes de Productos Terminados:** Exclusivamente destinados al almacenaje del resultado final del proceso de transformación.
- **Almacenes de Materia Auxiliar:** Sirve para almacenar repuestos, productos de limpieza, aceites, pinturas, etc. La demanda de estos productos suele ser estocástica.
- **Almacenes de preparación de pedidos y distribución:** Su objeto es acondicionar el producto terminado y ponerlo a disposición del cliente.

4.3.2. Según su ubicación

- **Almacenaje interior:** Almacenaje de productos con protección completa contra cualquiera de los agentes atmosféricos, permitiéndose incluso modificar las condiciones de temperatura e iluminación.

- **Almacenaje al aire libre:** Carecen de cualquier tipo de edificación y que están formados por espacios delimitados por cercas, marcados por números, señales pintadas, etc. Se almacenan productos que no necesitan protección contra los agentes atmosféricos.

4.3.3. Según el material a almacenar

- **Almacén para bultos:** El objetivo es juntar el material en unidades de transporte y de almacén cada vez mayores para el aprovechamiento pleno de la capacidad de carga de un vehículo para conseguir su transporte económico.
- **Almacenaje de gráneles:** Si es posible, debe estar en las proximidades del lugar de consumo debido a que el transporte es costoso. Hay que hacer transportable y almacenable el material que se puede verter. Su contenido debe poderse medir automáticamente, su extracción regulable y con conexión a un medio de transporte.
- **Almacenaje de líquidos:** Es un material específico de granel pero que pueden ser transportables por cañerías.
- **Almacenaje de gases:** Requieren unas medidas de seguridad especiales que han de ser observadas por la alta presión o la particular inflamabilidad.

4.3.4. Según su grado de mecanización

Según el grado de mecanización podemos distinguir distintos tipos de almacenes, en función de cómo se manipulen los productos, se usen los equipos y se apliquen los sistemas de almacenaje:

- **Almacén convencional:** Es aquel cuyo equipamiento máximo de almacenaje consiste en estanterías para el depósito de paletas, con carretillas de mástil retráctil. Esto influirá en las dimensiones del almacén, cuya altura oscilará entre 6 y 7 m; además deberá tener pasillos anchos para que discurran sin dificultad las carretillas.
- **Almacén mecanizado:** Es el almacén en el que la manipulación de productos se realiza mediante equipos automatizados, por lo que reduce al mínimo la actividad realizada por los trabajadores. Su altura sobrepasa los 10 m, por lo que permite almacenar mayor volumen de productos. Todo esto requiere que las unidades de carga tengan las mismas dimensiones.

4.3.5. Según su localización

- **Almacenes centrales:** aquellos que se localizan lo más cerca posible del centro de fabricación. Están preparados para manipular cargas de grandes dimensiones.
- **Almacenes regionales:** aquellos que se ubican cerca del punto de consumo. Están preparados para recoger cargas de grandes dimensiones y servir mediante camiones de distribución de menor capacidad.

4.3.6. Según su función logística

- **Centro de consolidación:** Estos almacenes reciben productos de múltiples proveedores y los agrupan para servirlos al mismo cliente.

- **Centro de ruptura:** Tienen la función inversa de los centros de consolidación. Recibe la carga de un número reducido de proveedores y sirven a un gran número de clientes, con necesidades dispares.
- **Centro de tránsito:** Conocidos en inglés como Cross-Dock, son almacenes que no almacenan, sólo mueven productos. Un ejemplo claro son los almacenes de transporte urgente. Este tipo de centros, muy complicados de gestionar, permite aumentar la eficiencia del transporte entre nodos y mantener altos niveles de servicio al cliente reduciendo el stock total.
- **Almacenes cíclicos o estacionales:** Son almacenes que recogen una producción puntual para hacer frente a una demanda constante, o que permiten resolver una demanda puntual frente a una producción más constante.
- **Almacenes de custodia a largo plazo:** Es el único de los almacenes analizados cuyo objetivo es estar lleno, sin importarle costes de transporte, demandas o ritmos de producción.

4.4. PRINCIPALES OPERACIONES DENTRO DE UN CENTRO DE ALMACENAMIENTO

En general, en cualquier centro de distribución o bodega pueden realizarse las siguientes operaciones principales:

- Recepción
- Almacenamiento
- Recolección de órdenes (Picking)
- Embalaje
- Despacho

4.4.1. Operaciones de Recepción

Las actividades de recepción, como su nombre lo indica, son las de recibir productos y materiales, generalmente en estibas completas o cajas y por medios masivos, procedentes de plantas manufactureras o proveedores externos. Esta operación puede comenzar con la notificación previa de la llegada de la mercancía al centro de distribución.

Una vez que los productos hayan llegado, estos se someten a un proceso de inspección, en el cual se evaluarán los posibles daños de la mercancía y el correcto número de artículos, entre otros (Bartholdi III & Hackman, 2011).

4.4.2. Operaciones de Almacenamiento

Como se ha mencionado anteriormente uno de los objetivos del almacenamiento es mejorar el servicio al cliente a través de la satisfacción del mismo, sin embargo para algunos autores esto deber estar sujeto a las restricciones de los recursos (espacio, equipo, personal y sistemas de información).

Como una condición necesaria para que los productos sean entregados rápidamente a los clientes y en buenas condiciones se debe tener en cuenta que al diseñar el sistema de almacenamiento se maximice la utilización del espacio, la utilización del equipo, la eficiencia del personal, la accesibilidad de los materiales y la protección de los mismos, así mismo para lograr lo anterior se debe seleccionar el equipo correcto, seleccionar y capacitar al personal adecuado, diseñar una correcta distribución de bodega, y asignar el espacio correcto a cada ítem (Vidal, 2010).

Las operaciones de almacenamiento requieren de gran cantidad de mano de obra, ya que es necesario desplazar los productos hasta su lugar de almacenamiento y generalmente las

distancias suelen ser considerables. Por esta razón el almacenamiento representa alrededor del 15% de los costos de las operaciones de centro de distribución o almacén (Frazelle, 2002).

4.4.3. Recolección de ordenes (picking)

La recolección de órdenes implica los procesos de agrupamiento y programación de los pedidos que realizan los clientes. El proceso de recolección de órdenes se refiere a la recuperación de los productos de sus lugares de almacenamiento. Una orden consiste en un subconjunto de productos presentes en el almacén, después de generada una orden, se genera una respuesta que envía a un recolector. Ya sea una persona o vehículo al punto donde se encuentre el ítem, lo toma, para luego dirigirse de nuevo al punto de partida (Ratliff & Rosenthal, 1983).

Las actividades de recolección de órdenes tienden a considerar mejoras como la consecución de una reducción en los costos de operación, reducir tiempos de entrega y lograr una mayor productividad dentro de los almacenes. Diversos estudios han revelado que la recolección de órdenes, es la actividad más costosa de una bodega o centro de distribución típico, representado el 65% de los costos operativos y el 50% de la fuerza de trabajo (Frazelle, 2002)

Se ha encontrado también, que la distribución de esta actividad en cuanto al tiempo que consume en promedio es aproximadamente; un 60% que corresponde al desplazamiento, 25% extracción de los productos, 10% búsqueda y 5% asociado a otras tareas. (Vidal, 2010)

4.4.4. Operaciones de embalaje

El embalaje es la operación en la cual se deben acondicionar y consolidar los pedidos; tomando en cuenta las decisiones que afectan la elección de los sistemas de protección y conservación de los productos cuando van a ser manipulados o transportados. Para ello es

necesario también, encontrar una unidad de embalaje adecuada, para así garantizar la reducción al mínimo de los gastos efectuados por concepto de transporte.

El embalaje es una de las operaciones que requiere mayor fuerza de trabajo, ya que cada uno de los ítems pertenecientes a los pedidos realizados por los clientes debe ser inspeccionado para poder comprobar que este se encuentre completo y en óptimas condiciones (Bartholdi III & Hackman, 2011).

4.4.5. Operaciones de despacho

La operación de despacho se encarga de consolidar unidades de transporte adecuadas, para ello se debe tener en cuenta los pedidos realizados por el cliente y la disponibilidad de los medios de transporte.

Aparte de los procesos físicos que se realizan en la zona de despacho (ubicar camiones, acumular y empacar la orden y cargar el camión con los pedidos) aquí se realizan también una serie de funciones de control y organización de las actividades relacionadas con el despacho de las mercancías. Entre ellas se encuentran: chequear las órdenes, confrontar las órdenes de despacho con las órdenes de los clientes y encontrar el costo óptimo de envío (Bravo, 2001).

El encontrar un costo óptimo de envío no es nada fácil, debido a la variedad de precios ofrecidos por los proveedores de servicios de transporte. Es por ello que la elección de un costo óptimo de envío requiere del estudio exacto de la cantidad a enviar (volumen y peso) así como de los destinos y la frecuencia del transporte. Al mismo tiempo se debe tener en cuenta la prioridad de la entrega, la disponibilidad de la mercancía, el tipo de mercancía y el tipo de almacenamiento entre otros (Hompel & Schmidt, 2007).

4.5. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

Según (Anaya Tejero, 2007) los sistemas de almacenamiento, se pueden dividir en los grupos que se explican a continuación:

4.5.1. Almacenamiento de piso

Este tipo de almacenamiento es conocido como aleatorio en “un solo nivel” del piso y es el sistema menos eficiente porque dificulta la localización de artículos.

4.5.2. Almacenamiento volumétrico (En bloque)

Este se presenta como un mejor método, en donde se apilan plataformas, recipientes, tambores de carga en bloques de tres a cinco unidades de altura sin pasillos, en este sistema se utiliza mejor el espacio cúbico pero se dificulta la recolección de artículos de atrás es decir al fondo de la pila y las cajas se pueden aplastar.

4.5.3. Anaqueles y estantería estáticos

Estos tienen bajos costos de capital y mantenimiento, obedecen al sistema UEPS, adecuados para muy escasa actividad, es poco ventajoso porque utilizan mucho espacio de piso ya que se necesitan pasillos por cada dos filas de almacenamiento, donde el tipo de montacargas determina el ancho del pasillo y la altura de las pilas. Sin embargo es necesario comentar que los artículos ocupan un pequeño porcentaje del espacio cúbico del estante.

4.5.4. Contenedores flexibles

Es una de las técnicas más recientes de almacenamiento, el contenedor flexible es una especie de saco hecho con tejido resistente y caucho vulcanizado, con un revestimiento interno que varía según su uso. Se utiliza para almacenamiento y movimiento de sólidos a granel y de líquidos, con capacidad que puede variar entre 500 a 1000 kilos. Su movimiento puede hacerse por medio de apiladoras o grúas.

4.5.5. Cajas o Cajones

Es la técnica de almacenamiento ideal para materiales de pequeñas dimensiones, como tornillos, anillos o algunos materiales de oficina, como lapiceros, lápices, entre otros. Algunos materiales en procesamiento o semiacabados pueden guardarse en cajas en las propias secciones productivas. Las cajas o cajones pueden ser de metal, madera o plástico, sus dimensiones deben ser esquematizadas y su tamaño puede variar significativamente.

4.5.6. Carga unitaria

Constituida por embalajes de transporte que se arreglan o acondicionan una cierta cantidad de material para hacer posible su manipulación, transporte y almacenamiento como si fuese una unidad. La carga unitaria es un conjunto de carga contenido en un recipiente que forma un todo en cuanto a la manipulación, almacenamiento o transporte. La formación de cargas unitarias se hacen a través de un dispositivo llamado pallet (plataforma), que es un estrado generalmente de madera esquematizado de diversas dimensiones. Sus medidas convencionales básicas son 1000 mm x 1200 mm como patrón internacional para adecuarse a los diversos medios de transporte y almacenamiento.

4.6. MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO

Una política de asignación de almacenaje es un conjunto de reglas que determina donde una cantidad de unidades de un determinado producto estará localizada dentro de un depósito. Una política de almacenaje se considera óptima si ella minimiza el tiempo medio requerido para almacenar y recuperar una unidad de carga cumpliendo las diversas restricciones impuestas por el sistema. Por ejemplo, la política de almacenaje óptima que asume el almacenaje dedicado (DED) está basada en el volumen de ventas de producto (Goetschalckx & Ratliff, 1990) .

En la literatura se encuentran numerosas maneras para asignar productos, sin embargo en este trabajo se presentarán los métodos o políticas más utilizadas por los centros de almacenamiento tradicional, entre las que encontramos: método de almacenaje dedicado, compartido, aleatorio, abierto, basado en clases, por agrupación de familias y políticas de almacenamiento de acuerdo a la rotación.

4.6.1. Almacenamiento Dedicado

El almacenamiento dedicado ocurre cuando un ítem es asignado a una localización específica o a un conjunto de localizaciones específicas. (Vidal, 2010). Esta política requiere que un lugar de almacenamiento sea reservado para cierto producto durante un horizonte de planificación entero, incluso cuando ocurre un faltante (“out-of-stock”) del producto, ocasionando esto una desventaja ya que disminuye la utilización del espacio, además este debe ser lo suficientemente grande debido a que se almacenan los inventarios máximos de cada uno de los productos de forma simultánea.

Sin embargo esta política presenta una ventaja y es que los recolectores pueden familiarizarse con las ubicaciones de los productos, disminuyendo así el tiempo de búsqueda de las localizaciones por parte de los mismos, y disminuyendo el tiempo de aprendizaje para nuevos empleados y empleados temporales (De Koster & Neuteboom, 2001).

En ciertos centros de distribución, se hace necesario considerar métodos especiales de almacenamiento dedicado, esto debido a la naturaleza de los productos algunos ellos son (PriceWaterHouseCoopers, 2001):

- **Por zonas:** Este tipo de almacenamiento agrupa las existencias de los productos teniendo en cuenta las características comunes de ellos.

- **De temperatura controlada:** Se utiliza cuando es necesario almacenar productos que requieren áreas de temperatura controlada para conservar sus características iniciales
- **Cuarentena de alto riesgo:** Aquí se ubican productos que requieren condiciones especiales de almacenamiento; tales como las sustancias controladas o las existencias de alto valor entre otros.

4.6.2. Almacenamiento Compartido

Este método de almacenamiento permite el almacenaje sucesivo de unidades de productos diferentes en la misma localización de almacenamiento lo que permite un uso más flexible del espacio que el permitido por la política de almacenamiento dedicado, ya que ofrecen la posibilidad de reducir el área máxima de almacenamiento y utilizar mejor las localizaciones de almacenamiento más deseables. Estos dos factores reducen el tiempo de viaje promedio.

La desventaja del almacenamiento compartido es que hay un aumento considerable de los datos y de los requerimientos computacionales para llevar un control de donde están localizados los productos y determinar dónde deben ser localizados los productos que llegan. (Goetschalckx & Ratliff, 1990).

4.6.3. Almacenamiento Aleatorio

El almacenamiento aleatorio ocurre cuando cualquier ítem puede ser almacenado en cualquier espacio disponible. Es decir los ítems que llegan al almacén son asignados a un lugar que se selecciona al azar entre todos los posibles lugares que se encuentren disponibles. Todos los lugares tienen la misma probabilidad de ser elegidos. La recolección se realiza en orden FIFO

("First In, First Out"), de tal forma que se produzca una adecuada rotación uniforme del inventario (Vidal, 2010).

Este método requerirá generalmente menos espacio que el almacenamiento dedicado. En primer lugar, si ocurre un faltante para un ítem, el espacio asignado a dicho ítem continúa activo para almacenamiento dedicado. Al contrario, dicho espacio podrá ser llenado por otros ítems en el almacenamiento aleatorio. Segundo, si existen múltiples espacios para un ítem dado, entonces a medida que el nivel de inventario disminuye, espacios vacíos adicionales aparecerán como disponibles (Vidal, 2010).

4.6.4. Almacenamiento Abierto

En (Koster, Le-Duc, & Roodbergen, 2007) se menciona que el almacenamiento abierto se presenta cuando los recolectores de los pedidos pueden elegir la posición para el almacenamiento de los productos. Por lo general estos eligen las primeras posiciones disponibles que encuentran, es decir que los productos son colocados lo más cerca posible a la entrada ya que este es el espacio disponible más cercano. En almacenes donde utilicen esta política no es raro encontrar que los estantes de la entrada están llenos y gradualmente los estantes que están en la parte de atrás más vacíos, lo que conlleva a la existencia de una capacidad excedente.

En (Hausman, Schwarz, & Graves, 1976) se plantea que el almacenamiento abierto y el almacenamiento aleatorio tienen un rendimiento similar si los productos son movidos por pallets completos.

4.6.5. Almacenamiento por Volumen de Ventas

Esta política distribuye los productos en el área de almacenamiento según su volumen de ventas. Los productos con los índices de ventas más altos están localizados en los lugares de más fácil acceso, por lo general cerca de la zona de despacho. Por el contrario los productos

que tienen menor rotación se encuentran ubicados en la parte posterior de los almacenes. (Koster, Le-Duc, & Roodbergen, 2007).

Una política de almacenamiento de este tipo se denomina Cube per Order Index, COI.

El COI de un producto es definido como la proporción del espacio total necesario para el producto por el número de viajes requeridos para satisfacer la demanda por período. El algoritmo consiste en localizar los artículos con el más bajo COI en el lugar más cercano a las puertas de despacho. (Koster, Le-Duc, & Roodbergen, 2007)

Otra definición según (Vidal, 2010) es: el COI es un índice que combina el número de veces que aparece un ítem en las órdenes y volumen del ítem. Y puede expresarse como:

$$\text{COI} = \frac{\text{Volumen promedio requerido para almacenamiento del producto}}{\text{Número promedio de órdenes diarias donde aparece el producto}}$$

Varios estudios han mostrado que si se ubican los ítems de acuerdo con el COI se produce:

- La distancia más corta a recorrer por orden seleccionada
- El tiempo mas bajo por viaje de recolección
- El tiempo mas bajo por línea de ítems seleccionada
- El espacio mínimo total requerido

4.6.6. Almacenamiento basado en Clases

El concepto de almacenamiento basado en clases combina algunos de los métodos mencionados hasta ahora. En el control de inventarios, una manera clásica para dividir los artículos en clases basándose en la popularidad es el método del Pareto. La idea es agrupar productos en clases, de tal forma que la clase de movimiento más rápido contiene alrededor del 15% de los productos almacenados, pero contribuye aproximadamente al 85% de la

demanda. Cada clase se asigna a un área dedicada del almacén. El almacenamiento dentro del área es al azar. Las clases se determinan por algunas medidas de frecuencia de demanda de los productos, tales como el COI o el volumen de recolección. Los ítems con movimiento más rápido son generalmente llamados Ítems- A. La siguiente categoría con movimiento más rápido de productos se llama ítems-B y así sucesivamente. A menudo, el número de clases se limita a tres, aunque en algunos casos más clases pueden dar ganancias adicionales con respecto a los tiempos de viaje (Koster, Le-Duc, & Roodbergen, 2007).

En base a los resultados experimentales de simulación, (Petersen & Aase, 2004) muestran que en lo que respecta a la distancia de viaje en un sistema de preparación de pedidos manual, el almacenamiento basado en el volumen de ventas supera al almacenamiento basado en clases. La brecha entre los dos depende de la estrategia de partición de las clases (es decir, número de clases, porcentaje del volumen total por clase) y el método de enrutamiento utilizado. Sin embargo, sugieren el usar el método de almacenamiento basado en clases con 2 a 4 clases en la práctica, ya que es más fácil de implementar que el método basado en el volumen; y no requiere de una lista completa de los productos clasificados por volumen y requiere menos tiempo para administrar que los otros métodos dedicados (Koster, Le-Duc, & Roodbergen, 2007).

4.6.7. Almacenamiento por Agrupación de Familias

Hasta el momento todos los métodos de almacenamiento mencionados, no implican las posibles relaciones entre los productos. Por ejemplo, los clientes pueden pedir un determinado producto, junto con otro. En este caso, puede ser interesante localizar estos dos productos uno cerca del otro. Un ejemplo de esto es la llamada agrupación por familias, que consiste en ubicar en la misma zona de almacenamiento los productos con características similares (Koster, Le-Duc, & Roodbergen, 2007)

En la literatura, se mencionan dos tipos de métodos de agrupación de familia, los cuales se presentan a continuación:

- **Método de almacenamiento basado en la complementariedad**

Este contiene dos fases principales, en la primera fase se reúnen los productos en grupos donde se mide la fuerza de la demanda conjunta ('complementariedad'). En la segunda fase, se localizan los productos que están dentro del grupo tan cerca como sea posible uno del otro.

- **Método de almacenamiento basado en el contacto**

Este método es similar al método basado en la complementariedad, solo que en este método se utiliza las frecuencias de contacto del conjunto de productos dentro de los grupos. La frecuencia de contacto entre el producto tipo i y el producto tipo j se define como el número de veces que un recolector de pedido escoge el producto tipo i y directamente después el producto tipo j , o el producto tipo j y directamente después el producto tipo i . La localización de los productos se realiza localizando tan cerca como sea posible los productos con las frecuencias de contacto mayor.

A continuación se realiza una síntesis de los atributos y variables identificados en la Caracterización de los diferentes métodos de ubicación de bienes en centros de almacenamiento encontrados mediante la revisión bibliográfica (tablas 1 a 3):

	Variables	Atributos	
Método de almacenamiento	Características	Ventajas	Desventajas
Almacenamiento Dedicado (Vidal, 2010), (De Koster & Neuteboom, 2001), (PriceWaterHouseCoopers, 2001)	El almacenamiento dedicado ocurre cuando un ítem es asignado a una localización específica o a un conjunto de localizaciones específicas. Esta política requiere que un lugar de almacenamiento sea reservado para cierto producto durante un horizonte de planificación entero	▪ Los recolectores se familiarizan con las ubicaciones de los productos. ▪ Se disminuye el tiempo de búsqueda de los productos. ▪ Disminuye el tiempo de aprendizaje para nuevos empleados y empleados temporales.	▪ Disminuye la utilización del espacio. ▪ El espacio para almacenamiento es muy grande. ▪ Se tienen inventarios máximos de cada uno los productos.
Almacenamiento Compartido (Goetschalckx & Ratliff, 1990)	Este método permite el almacenamiento sucesivo de unidades de productos diferentes en la misma localización de almacenamiento.	▪ Uso más flexible del espacio. ▪ Área de almacenamiento más reducida. ▪ Mejor utilización de las localizaciones más deseables. ▪ Reducción del tiempo de viaje promedio.	▪ Aumento considerable de los datos y de datos y de los requerimientos computacionales para llevar un control de donde están localizados los productos y determinar dónde deben ser localizados los productos que llegan.
Almacenamiento Aleatorio (Vidal, 2010)	El almacenamiento aleatorio ocurre cuando cualquier ítem puede ser almacenado en cualquier espacio disponible. Es decir los ítems que llegan al almacén son asignados a un lugar que se selecciona al azar entre todos los posibles lugares que se encuentren disponibles.	▪ Todos los lugares de almacenamiento tienen la misma probabilidad de ser elegidos. ▪ Se produce una adecuada rotación del inventario. ▪ Maximiza el uso eficiente del espacio.	▪ La ubicación de los bienes debe registrarse correctamente porque se pueden presentar pérdidas de los productos. ▪ Incrementa la distancia de recolección de ordenes

Tabla 1. Caracterización de los métodos de almacenamiento -a.
[Fuente: Elaboración propia]

Método de almacenamiento	Características	Ventajas	Desventajas
Almacenamiento Abierto (Koster, Le-Duc, & Roodbergen, 2007), (Hausman, Schwarz, & Graves, 1976)	El almacenamiento abierto se presenta cuando los recolectores de los pedidos pueden elegir la posición para el almacenamiento de los productos por lo general estos eligen las primeras posiciones disponibles que encuentran, es decir que los productos son colocados lo más cerca posible a la entrada ya que este es el espacio disponible más cercano.	• Al igual que en el almacenamiento aleatorio se realiza una adecuada rotación del inventario de los productos.	• Se utilizan generalmente solo los lugares más cercanos a la puerta de entrada. • Se subutiliza la capacidad del centro.
Almacenamiento por Volumen de Ventas (Koster, Le-Duc, & Roodbergen, 2007), (Vidal, 2010)	Esta política distribuye los productos en el área de almacenaje según su volumen de ventas. Los productos con los índices de ventas más altos están localizados en los lugares de más fácil acceso, por lo general cerca de la zona de despacho. Por el contrario los productos que tienen menor rotación se encuentran ubicados en la parte posterior de los almacenes. Una política de almacenamiento de este tipo se denomina Cube per Order Index, COI. El cual combina el número de veces que aparece un ítem en las órdenes y volumen del ítem.	• Permite recorrer la distancia más corta por orden seleccionada. • El tiempo por viaje de recolección es más bajo. • El tiempo por línea de ítems seleccionada es más bajo. • El espacio total requerido es mínimo.	• Las tasa de demanda varían constantemente y la variedad de productos cambia frecuentemente. • Se requiere información intensiva de los productos y en muchos casos no se tiene.

Tabla 2. Caracterización de métodos de almacenamiento -b.
[Fuente: Elaboración propia]

Método de almacenamiento	Características	Ventajas	Desventajas
Almacenamiento basado en Clases (Vidal, 2010)	Una manera clásica para dividir los artículos en clases basándose en la popularidad es el método del Pareto. La idea es agrupar productos en clases, de tal forma que la clase de movimiento más rápido contiene alrededor del 15% de los productos almacenados, pero contribuye aproximadamente al 85% de la demanda. Cada clase se asigna a un área dedicada del almacén. El almacenamiento dentro del área es al azar. Las clases se determinan por algunas medidas de frecuencia de demanda de los productos, tales como el COI o el volumen de recolección. Los ítems con movimiento más rápido son generalmente llamados Ítems- A. La siguiente categoría con movimiento más rápido de productos se llama ítems-B y así sucesivamente.	▪Permite saber cuáles son aquellas referencias que acumulan un porcentaje elevado del volumen total del inventario o existencias gestionadas en el almacén. ▪También permite saber cuáles referencias acumulan un porcentaje reducido del volumen total. ▪Requiere menos tiempo para la administración de stocks.	▪Las distancias para la recolección de pedidos son altas comparado con el almacenamiento por volumen de ventas. ▪Se requiere más espacio para el almacenamiento.
Almacenamiento por Agrupación de Familias (Koster, Le-Duc, & Roodbergen, 2007)	El método de agrupación por familias consiste en ubicar en la misma zona de almacenamiento los productos con características similares.	▪Permite una mejor organización del inventario. ▪Se disminuyen distancias y tiempos de recolección	▪Incrementa el espacio requerido. ▪Los costos por almacenamiento aumentan teniendo en cuenta el espacio requerido.

Tabla 3. Caracterización de los métodos de almacenamiento -c.

[Fuente: Elaboración propia]

En las tablas 1 a 3 se realizó la síntesis de las variables y atributos de los métodos de almacenamiento utilizados para centros de almacenamiento tradicionales, por lo que en el capítulo siguiente se presentarán los elementos más importantes para los centros de

almacenamiento Cross Docking, donde se identificarán las características propias de estos sistemas y se tendrán las herramientas necesarias para decidir qué criterios se deben utilizar para el desarrollo de la propuesta metodológica.

5. CENTROS DE ALMACENAMIENTO CROSS DOCKING

5.1. ¿QUÉ ES EL CROSS-DOCKING?

El Cross Docking es una estrategia logística en la cual se realiza movimiento de productos a través de centros de distribución con almacenamiento muy corto o sin almacenamiento. En una bodega tradicional, el producto se mueve por los procesos de recepción, almacenamiento por largos periodos de tiempo, recolección de pedidos y luego se envía. En un centro Cross Docking, el producto se mueve directamente desde el muelle de recepción hasta el muelle de envío con poco o sin almacenamiento de producto en la bodega. La clave para el éxito de esta estrategia es tener un período muy corto de detención entre la recepción y el envío. Cuanto más corto sea el período, más pequeño es el almacenamiento necesario. (Apte & Viswanathan, 2000)

5.2. BENEFICIOS DEL CROSS DOCKING

Mediante la utilización de centros Cross Docking se logra una reducción significativa en los costos de transporte sin aumentar los niveles de inventario promedio y al mismo tiempo brindando un alto nivel de servicio al cliente. También, en muchos casos, el nivel de inventario que se tiene en el almacén se reduce con el Cross Docking, que a su vez conduce a una reducción de los costos de mantener inventario. Éste también tiene otros beneficios tales como la reducción del tiempo de ciclo de las órdenes, lo que ayuda a mejorar la flexibilidad y capacidad de respuesta de la red de distribución, ayuda también a reducir los requerimientos de espacio y los costos de manejo de materiales. Estos beneficios sólo pueden lograrse mediante: (a) el manejo eficaz del flujo físico de productos, (b) a partir del despliegue eficaz de las tecnologías de información avanzada para gestionar el flujo de información; (c) el uso eficaz de los envíos FTL (camiones con cargas completas), y (d) el uso efectivo de una adecuada planificación y de las herramientas de gestión. (Apte & Viswanathan, 2000)

5.3. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS CROSS DOCKING

En la práctica del Cross Docking se pueden encontrar diferentes situaciones en las cuales las operaciones que se realizan varían para cada una de ellas. A continuación se presenta una clasificación de los sistemas Cross Docking, propuesta en (Shaffer, 1997):

5.3.1. Cross Docking para justo a tiempo

Se refiere al Cross Docking utilizado para la recepción de componentes o materia prima. Sin embargo, la utilización de este sistema es mucho más aplicada al envío de productos terminados, donde se han demostrado importantes beneficios.

5.3.2. Cross Docking para distribución

Estas terminales involucran la recepción de unidades de carga completas como por ejemplo las estibas, y se despachan las mismas unidades, es decir que no hay una partición de la carga, sino que se envían estas mismas cargas en los cargamentos de despacho.

5.3.3. Terminales Cross Docking

Las terminales Cross Docking son esencialmente instalaciones de transbordo, en donde llegan camiones con bienes que deben ser clasificados, almacenados temporalmente, consolidados y posteriormente cargados en camiones para su salida, estos camiones pueden haber sido cargados en un sitio de fabricación, un punto de venta, u otro centro, dependiendo de la aplicación. En estas terminales se pueden recibir mercancías de dos o más proveedores, se almacenan en dispositivos como bastidores o repisas y en el momento en que un cliente

solicita un elemento, los trabajadores de recolección son los encargados de enviarlos a su destino. En la ilustración 2 se observa el diseño de una terminal Cross Docking:

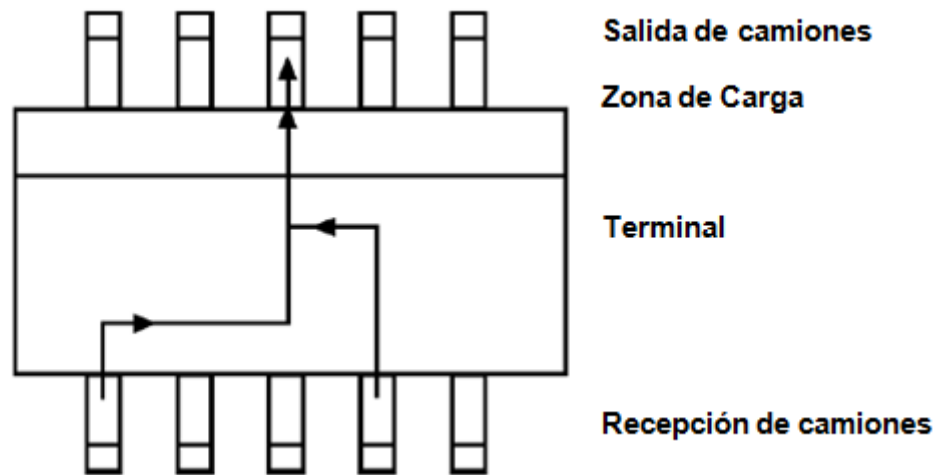


Ilustración 2. Típica Terminal Cross Docking

[Fuente: Elaboración propia]

5.4. OTRA CLASIFICACIÓN

Otra manera de clasificar operaciones Cross Docking es de acuerdo al momento en el que se clasifican los pedidos para los clientes según (Yan & Tang, 2009):

5.4.1. Pre- distribución Cross Docking (Pre-C)

Pre-C es un proceso puro de Cross Docking en el cual los productos que llegan al centro Cross Docking se cargan directamente en camiones para ser entregados a los clientes. Los proveedores de los productos se deben hacer cargo de la preparación y clasificación de los mismos. Este proceso generalmente incluye la fijación de los códigos de barras, el etiquetado, la fijación de precios y la clasificación de los productos de acuerdo a la demanda del cliente, para facilitar la carga y la entrega inmediata en el Cross Docking. Pre-C requiere que los

proveedores conozcan la cantidad de pedido realizado por el cliente en cada período para poder realizar el trabajo de preparación y clasificación de los pedidos.

5.4.2. Post- distribución Cross Docking (Post-C)

Post-C transfiere la tarea de los proveedores al centro Cross Docking. A diferencia del pre-C, las operaciones del post-C implican la clasificación de los productos que son enviados por los proveedores y luego de clasificarlos son transportados a los camiones para ser enviados a los clientes, estas operaciones son realizadas en el centro Cross Docking. Lo que sugiere que hay un almacenamiento intermedio de los productos entre la recepción y el despacho en el centro Cross Docking. El tiempo que un producto es almacenado puede variar, pero no se debe exceder el límite de tiempo para que la operación realmente sea Cross Docking, el cual se sugiere en (Shaffer, 1997) sea máximo un día.

5.5. CARACTERÍSTICAS DE LOS CENTROS CROSS DOCKING

(Van Belle, Valckenaers, & Cattrysse, 2012) brindan la siguiente clasificación de las características de un centro Cross Docking:

5.5.1. Características físicas

Las características físicas de los centros Cross Docking son fijas (por un largo periodo de tiempo). Las siguientes características se consideran físicas:

- **La forma**

La forma ó geometría de los centros Cross Docking busca obtener un flujo eficiente entre los muelles de entrada y los muelles de salida.

La configuración típica para los centros de distribución *Cross Docking* resulta ser un rectángulo alargado, donde se ubica el muelle de entrada frente al muelle de salida.

Sin embargo, no es la única forma geométrica utilizada. También se utilizan terminales en forma de “X”, de “T”, de “L” y en forma de “H” pero con el principal inconveniente, de que en cada una de las esquinas, el centro de distribución pierde capacidad (Bartholdi III & Hackman, 2011), a continuación se presentan algunas de las formas mencionadas:

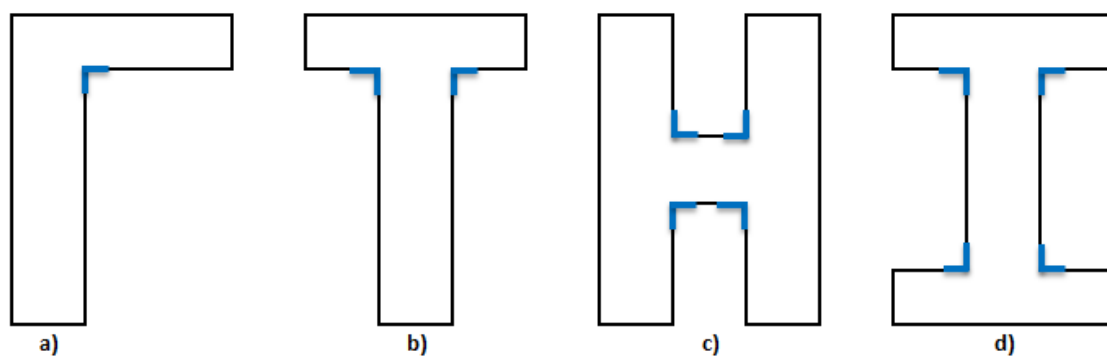


Ilustración 3. Formas de terminales Cross Docking
[Fuente: Elaboración propia]

Bartholdi et al (Bartholdi III & Gue, 2004), Investigaron la mejor forma para un centro Cross Docking y llegaron a la conclusión que de acuerdo a las distancias medias a cubrir entre dos puertas de embarque (entrada y salida), la forma “I” es la más adecuada para centros Cross Docking con menos de 150 puertas, la forma “X” es la más conveniente para centros con 200 puertas o más, y las terminales entre 150 y 200 puertas de embarque deben ser en forma de T. Se debe tener en cuenta que la forma de “L” es siempre inferior a la forma “I”, ya que proporciona una esquina adicional sin disminuir la distancia media entre las puertas de embarque. Sucede lo mismo para la forma de “H” en comparación con la forma “X”.

- **Tamaño**

Es común que el tamaño de un muelle Cross Docking sea resumido simplemente con el número de puertas que este tenga.

Por lo que una de las primeras decisiones estratégicas que se deben tomar respecto a las terminales logísticas tipo Cross Docking, es cuántas puertas debería tener la terminal en cada uno de sus muelles.

En la práctica, los centros Cross Docking varían en tamaño de 6 a 8 puertas a más de 200 puertas, e incluso existe centros Cross Docking con más de 500 puertas (Gue, 1999).

La configuración de cada tipo de terminal debe ser estática, es decir, si en un muelle las puertas se designan como puertas de salida, dichas puertas no pueden ser utilizadas como puertas de entrada, ya que tanto el personal interno, como quienes se encargan de manejar los camiones en el exterior, deben tener clara dicha configuración para evitar que se cometa algún error por la confusión.

La experiencia muestra que es mucho más fácil descargar que cargar. Una buena aproximación a esto la brinda (Bartholdi III & Hackman, 2011) quienes dicen que cargar un camión requiere el doble del tiempo que se requiere para descargarlo. Cuando se carga, además de mover el material al interior de un medio transporte, se busca alcanzar una eficiencia en el uso del espacio interior y también cumplir algunos requerimientos, los cuales dependen de la orden de los clientes.

El problema se reduce a determinar la cantidad de puertas de salida necesarias para cumplir con la demanda proyectada, y buscar el número de puertas de entrada que pueda soportar ese flujo de materiales. Es decir, el problema resulta ser el balance entre los flujos de entrada y de salida de la terminal.

Esta es una buena aproximación para determinar el tamaño de la terminal en cuanto a número de puertas en cada muelle, sin embargo ese balance también se puede lograr con la asignación de personal a la carga y/o a la descarga de los cargamentos.

El número de personas dedicadas a la carga y/o descarga, también depende del tiempo requerido para completar dichas tareas, es decir, que si hay una relación entre la cantidad de personas descargando/cargando y el tiempo requerido para hacerlo, por lo cual, los flujos de productos (lo que entra y lo que sale), también pueden llegar a ser balanceados por este medio.

Es importante resaltar, que las terminales con una gran cantidad de puertas en cada muelle suelen ser menos eficientes que las que tienen pocas, esto debido a que las posibilidades de que un cargamento que entra a la terminal, quede cerca a una de las puertas de salida donde se requiera dichos productos, es más baja debido a la mayor cantidad de posibilidades, cosa que no sucede cuando hay una menor cantidad de puertas en cada muelle.

- **Transporte interno**

El transporte dentro de los centros Cross Docking se puede ejecutar de forma manual (por ejemplo, por los trabajadores que utilizan montacargas) o puede haber un sistema automatizado en su lugar (por ejemplo, una red de bandas transportadoras). La infraestructura disponible, por supuesto, dependerá del tipo de carga que se maneje en el centro Cross Docking. Por ejemplo, los transportadores LTL que manejan cargas paletizadas hacen uso de carretillas elevadoras. Por otro lado, los sistemas de transporte son utilizados por las compañías de paquetería, al tratar con muchos (pequeños) paquetes. También es posible realizar una combinación de ambos modos de transporte. (Van Belle, Valckenaers, & Cattryse, 2012)

5.5.2. Características operacionales

Algunas decisiones operativas pueden influir en el funcionamiento del centro Cross Docking. Estas limitaciones operativas tienen las siguientes características:

- **El modo de servicio**

De acuerdo con (Boysen & Fliedner, 2010) el modo de servicio de un centro Cross Docking determina los grados de libertad en la asignación de camiones de entrada y salida a las puertas del muelle. En un **modo exclusivo** de servicio, cada puerta se dedica en forma exclusiva a los camiones entrantes o salientes. Si se utiliza este modo de servicio, un lado del centro Cross Docking se asigna a los camiones de entrada y el otro lado a los camiones de salida. Un segundo modo es el **modo mixto**. En este modo, los camiones entrantes y salientes se pueden procesar en todas las puertas. Estos dos modos también se pueden combinar. En el **modo combinado**, un subconjunto de las puertas se opera en modo exclusivo, mientras que el resto de las puertas se opera en modo mixto.

- **Prioridad de compra**

Si se permite la prioridad de compra, la carga o la descarga de un camión puede ser interrumpida. Este camión se retira del muelle y otro camión toma su lugar. El camión sin terminar tiene que ser acoplado después para terminar la carga o descarga. (Van Belle, Valckenaers, & Cattrysse, 2012)

5.5.3. Características del Flujo

Las características del flujo de los productos que tienen que ser procesados por un centro Cross Docking pueden ser muy diferentes. Se distinguen las siguientes características:

- **Patrones de llegada**

Los tiempos de llegada de las mercancías se determinan por los tiempos de llegada de los camiones entrantes. El patrón de llegada puede ser **concentrado** en uno o más períodos si los camiones entrantes llegan juntos en (más o menos) los mismos tiempos. Otra posibilidad es que el patrón de su llegada se encuentre **disperso** y los camiones entrantes lleguen en diferentes momentos durante el día. El patrón de llegada tiene una influencia sobre la congestión de los centros Cross Docking, en la programación de los trabajadores y de los recursos. (Van Belle, Valckenaers, & Cattrysse, 2012)

- **Hora de salida**

Los horarios de salida de los camiones pueden ser restringidos o no. En muchos casos no hay restricciones y los camiones salen del centro Cross Docking después de realizar la carga o descarga de todos los productos. Sin embargo, es posible que los camiones tengan que salir antes de cierta hora, por ejemplo con el fin de llegar a tiempo a una tarea de transporte siguiente. En este caso, pueden haber restricciones impuestas a los horarios de salida de los camiones de entrada, de modo que los camiones tienen que ser descargados a tiempo. De una manera similar, es posible que sólo los camiones de salida tengan que dejar el centro Cross Docking antes de un determinado momento. Por último también es posible que tanto los camiones de entrada y salida tengan restricciones en los horarios de salida. (Van Belle, Valckenaers, & Cattrysse, 2012)

- **Intercambiabilidad del producto**

La carga manipulada en un centro Cross Docking en general, no es intercambiable. En este caso, todos los productos están colocados en un destino específico o en un camión específico de salida (pre-distribución). La información sobre el destino o sobre el camión normalmente se conoce antes de que los productos lleguen al centro Cross Docking. No obstante, es posible también permitir la intercambiabilidad de los productos (post-distribución). En esta situación,

sólo se conoce el tipo de productos que se cargan en los camiones de salida y la cantidad correspondiente de cada uno. Cuando los productos son intercambiables, por lo general deben llevarse a cabo algunas de las actividades de valor añadido (por ejemplo, el etiquetado) (Van Belle, Valckenaers, & Cattrysse, 2012).

5.6. OPERACIONES EN LOS CENTROS CROSS DOCKING

Las operaciones más frecuentes de los centros de distribución Cross Docking son la recepción, el almacenamiento temporal, la consolidación, el reempaque, el re-estibado, la clasificación de los pedidos, el picking y el envío. A continuación se explican algunas de ellas, se acuerdo a lo leído en (Van Belle, Valckenaers, & Cattrysse, 2012) y en (Yan & Tang, 2009):

5.6.1. Recepción

Esta operación se realiza en las puertas de descarga, estas pueden ser ocupadas por cualquier camión de entrada, independientemente de su origen o su contenido, se pueden descargar los productos directamente en una puerta de descarga libre, sin embargo si ninguna puerta está disponible, se debe esperar hasta que se libere una de ellas para así poder dar inicio a la recepción de la carga del camión.

5.6.2. Almacenamiento

Aunque la idea del Cross Docking es descargar los productos de los camiones que entran y directamente cargarlos en los camiones que salen, el almacenamiento temporal es inevitable en estos centros debido a que no existe una sincronización perfecta entre los camiones de entrada y de salida, es decir que los productos no llegan en el orden en que se deben cargar y

esto hace que sea necesario el almacenamiento. Además, también se requiere cuando se deben realizar actividades de clasificación de pedidos dentro del centro de almacenamiento.

Por lo general, los productos se almacenan temporalmente en el piso o en un depósito pequeño. Sin embargo, es posible encontrar productos a los cuales no se les permite ser almacenados en el centro debido a que requieren el cumplimiento de una cadena de frío y por lo tanto deben ser transportados directamente de un camión de entrada con refrigeración a un camión de salida con igualdad de condiciones.

5.6.3. Clasificación de los pedidos

Esta operación se da en los centros Cross Docking Post-distribución (Post-C) a los cuales se transfieren las tareas de clasificación de pedidos realizada por los proveedores en los centros de tipo (Pre-C). Las operaciones del Post-C implican la clasificación de los productos que son enviados por los proveedores para posteriormente ser enviados a los clientes.

5.6.4. Picking

Esta es una operación básica en la preparación de pedidos de un centro de almacenamiento Cross Docking ya que después de haberse realizado la clasificación de los pedidos estos deben ser recogidos por los operarios y directamente ser cargados en los camiones de salida para finalmente ser entregados a los clientes.

5.6.5. Envío

Es la etapa final de las operaciones del centro Cross Docking donde los pedidos ya clasificados y etiquetados son enviados según la orden de cada cliente. En esta operación se realiza el cargue de los camiones de salida.

5.7 IDENTIFICACIÓN DE TIPOS DE PRODUCTOS A MANEJAR BAJO UNA ESTRATEGIA DE CROSS DOCKING

El identificar el producto idóneo para manejarlo bajo una estrategia de Cross Docking, debe ser evaluado bajo cuatro aspectos¹: popularidad del producto, volumen físico, variación de la demanda, ciclo de vida y precio del producto (Palma Estrada, 2012).

- **Popularidad del producto:** se refiere a la cantidad de veces o frecuencia que el producto aparece en las órdenes emitidas por los clientes. A mayor frecuencia, mayor cantidad de producto solicitado. Un producto con mayor demanda, es más idóneo manejarlo bajo una estrategia de Cross Docking que el que pasa mayor tiempo almacenado. Es importante aclarar que popularidad equivale la frecuencia de veces pedido el artículo y no al volumen en cantidad pedida.

$$\text{Popularidad} = \text{número de veces pedido}$$

- **Volumen físico:** este punto se refiere a la volumetría del total pedido. El mantener producto voluminoso ocupa bastante espacio en una bodega o Centro de Distribución, por lo tanto lo más idóneo es no mantener inventario de estos productos.

$$\text{Volumen físico} = \text{volumen del producto} * \text{total pedido}$$

- **Variación de la demanda:** esto se refiere a los patrones de demanda de cada uno de los productos. Un producto con una demanda constante, es necesario manejarlo bajo una estrategia de Cross Docking.

$$\text{Coeficiente de variación} = \text{desviación estándar} / \mu$$

¹ Optimal Decision-making on Product Ranking For Cross docking/ Warehousing Operations.

- **Ciclo de vida y costo del producto:** una estrategia de Cross Docking es necesario aplicarla a productos que tienen un costo alto, ya que el riesgo a que se pierda o deteriore es menor al mantenerlo almacenado. De igual forma el mantener producto caro almacenado, es mantener dinero estancado. Con respecto al tema de ciclo de vida del producto, es aplicado para productos que tienen un ciclo de vida corto (electrodomésticos) y para productos que tienen una caducidad a corto plazo (verduras, frutas, lácteos, etc.)

$$\text{Prioridad} = \text{costo por unidad} / \text{vida del producto}$$

6. UBICACIÓN DE PRODUCTOS EN CENTROS CROSS DOCKING

La asignación de lugares de almacenamiento a productos o la ubicación de productos en lugares de almacenamiento en centros *Cross Docking*, ha sido estudiada en los siguientes trabajos:

- **Ubicación de productos con minimización de distancia total de recorrido.**

(Vis & Roodbergen, 2008) Realizan un estudio que busca determinar los lugares de almacenamiento temporal para los productos que entran a un centro Cross Docking de tal manera que la distancia total de recorrido de los productos sea mínima. Para esto asumen que se conocen las puertas de carga y descarga, las distancias de recorrido entre cada par de puertas, la capacidad del centro Cross Docking y por lo tanto la capacidad de cada fila de almacenamiento.

En este trabajo los autores muestran que el problema puede ser modelado como un problema de flujo de costos mínimos, el cual puede resolverse con varios algoritmos en tiempo polinomial, el principal objetivo es plantear un algoritmo que determine los lugares de almacenamiento de los productos que llegan a un centro Cross Docking de tal manera que las distancias totales que se recorren sean mínimas.

En esta investigación se realizaron varios experimentos numéricos para comparar el método propuesto con una situación en la que los trabajadores pueden elegir los lugares de almacenamiento que por lo general se traduce en productos almacenados en los lugares disponibles más cercanos a la puerta de origen de las cargas. Los resultados muestran que el algoritmo propuesto puede reducir la distancia de recorrido total hasta aproximadamente un 40%. El método también puede ser fácilmente adaptado a otras situaciones tales como diferentes diseños y donde la carga toma más tiempo que la descarga.

- **Ubicación de productos a las áreas funcionales con determinación del tamaño de cada área.**

En el trabajo realizado por Heragu et al (Heragu, Du, Mantel, & Schuur, 2005), se presenta un modelo matemático y un algoritmo heurístico que determinan en conjunto la asignación de productos a las áreas funcionales del almacén así como el tamaño de cada área a partir de datos suministrados por el administrador de almacén.

Para el desarrollo de este modelo se consideraron las siguientes áreas funcionales:

- Área de Cross Docking
- Área de almacenamiento de reservas
- Área de envío

En una bodega con las anteriores áreas funcionales se pueden presentar los siguientes flujos de materiales:

- **Flujo 1:** Recepción – cross-docking – Despacho
- **Flujo 2:** Recepción – Área de almacenamiento – Despacho
- **Flujo 3:** Recepción – Área de almacenamiento – Área envío – Despacho
- **Flujo 4:** Recepción – Área de envío – Despacho (ver ilustración 4)

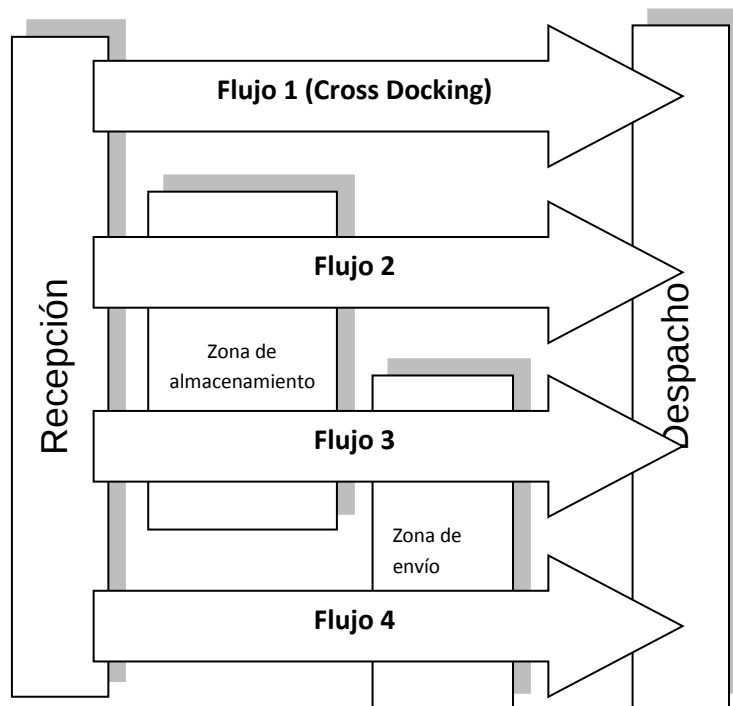


Ilustración 4. Flujos típicos de los productos en una bodega

**[Fuente: Traducido de Heragu, L. Du, C.S., Mantel, R.M., & Schuur, P.M.,
Mathematical model for warehouse design and product allocation.]**

Flujo 1. Es la operación del Cross Docking. Una vez recibido, los productos son puestos en espera por un período de tiempo corto y luego se trasladan al área de envío, o directamente se despachan. Los productos recibidos son típicamente preclasificados en las instalaciones de los proveedores.

La operación aquí es simplemente pasar el producto al cliente o a la siguiente instalación de la cadena de suministro. Un gran número de compañías usan esta estrategia para la eficiencia de la operación y el manejo de la cadena de suministro (Editor, 2001) .

Flujo 2. Es una operación típica en una bodega. Los productos se almacenan en el área de la reserva y la operación recolección de los pedidos se realiza cuando sea necesario. Se supone que por lo general, sólo los productos que permanecen en la bodega durante períodos de

tiempo relativamente prolongados y transportados de esta manera (o con operaciones de valor agregado mínimo) se destinarán al área de almacenamiento de reserva.

Flujo 3. Es también una operación típica de una bodega. Los productos se almacenan primero en la zona de reserva por lo general en pallets, dividido en cargas más pequeñas (cajas de cartón o cajones) y luego se trasladan al área de envío para la recolección rápida de pedidos, consolidación de pedidos o la realización de valor agregado en las operaciones.

Flujo 4. Puede ser considerado como otra forma de la operación Cross Docking.

Se reciben los productos y luego se colocan directamente en la zona de envío para llevar a cabo la consolidación de las órdenes.

Este tipo de operación se suele ver en las bodegas de proveedores, o cuando hay una necesidad de consolidar grandes pedidos.

En (Heragu, Du, Mantel, & Schuur, 2005) se presenta un modelo matemático que determina el flujo al cual cada producto debe ser asignado y como resultado el tamaño de las áreas funcionales dentro de la bodega.

Los supuestos son los siguientes:

- Se conoce la disponibilidad total del espacio de almacenamiento
- Se conoce el tiempo de permanencia de cada producto en almacenamiento.
- Se conocen los costos de manejo de cada producto en cada flujo.
- El tiempo de permanencia y el costo tienen una relación lineal.
- Se conocen las tasas de demanda anual de cada producto.
- Las políticas de almacenamiento y el equipo de manejo de material son conocidos y afectan la unidad de manejo y los costos de almacenamiento.

La función objetivo que minimiza el modelo es la siguiente:

$$\min \quad 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 q_{ij} H_{ij} \lambda_i X_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 (q_{ij} C_{ij} Q_i X_{ij} / 2)$$

Donde q_{ij} representa la asignación del producto i al flujo de materiales j , H_{ij} es el costo de llevar una unidad de carga del producto i en el flujo de materiales j , λ_i representa la tasa anual de demanda del producto i en unidades de carga, X_{ij} es una variable binaria la cual es 1 si el producto i se asigna al tipo de flujo j y es 0 en caso contrario, C_{ij} es el costo anual de almacenar una unidad de carga de producto i en el flujo de materiales j y Q_i es la cantidad ordenada del producto i (En unidades de carga).

Con el modelo y la heurística desarrollados se resuelven dos problemas conjuntamente de tal manera que los costos anuales de manejo de materiales y los costos de almacenamiento son minimizados. Este modelo puede ser usado para diferentes bodegas ya que considera restricciones reales.

- **Asignación de productos a bodegas de almacenamiento tradicional y Cross Docking en la cadena de suministro de bienes de consumo masivo (FMCG).**

En (Li, Sim, Low, & Lim, 2008) se presenta una herramienta para la ubicación de productos de consumo masivo (FMCG) en centros de almacenamiento tradicionales que tienen dentro de su distribución un espacio dedicado al Cross Docking, teniendo como objetivo minimizar el costo total de operaciones de la instalación y cumplir con la demanda durante un período de tiempo determinado.

Siendo un poco más específicos, la decisión de almacenamiento a la cual se enfrentan estos autores consiste en cuáles y cuántos productos deben asignarse a la bodega Cross Docking y cuántos a la bodega tradicional teniendo en cuenta criterios como la popularidad del producto, el volumen, la variación de la demanda y el ciclo de duración de los mismos.

Aplicando los siguientes supuestos en su estudio:

- ✓ El modelo se aplica a un centro de distribución que tiene tanto funciones Cross Docking como almacenamiento tradicional, pero las capacidades de ambas instalaciones de almacenamiento son limitadas.
- ✓ Varios tipos de productos son procesados en las instalaciones.
- ✓ Los productos son empacados en pallets. Un pallet incluye un tipo de producto.
- ✓ Un contenedor puede tener múltiples pallets los cuales están con diferentes tipos de productos. Se conocen los costos de procesamiento de una unidad de producto en la bodega almacenamiento y en el centro Cross Docking.

A manera de ejemplo los autores plantean el siguiente escenario:

Un minorista R vende tres productos: el Producto A, Producto B y el producto C. El espacio requerido para la demanda de cada producto A,B;C es 75, 150 y 375, respectivamente.

El centro de distribución del minorista R tiene tanto bodegas de almacenamiento e instalaciones crossdock con capacidad limitada. Las capacidades suministradas de las bodegas de almacenamiento y Cross Docking son 350 y 150 respectivamente.

Los costos de procesamiento por unidad de producto puede ser calculados. En este ejemplo, asumen que el costo de una unidad de espacio a través de la bodega de almacenamiento para los productos A, B, C, son 10, 30 y 50, respectivamente. El costo de una unidad de espacio a través de crossdock para los productos A, B, y C es de 20, 40 y 50, respectivamente. La capacidad de suministro de la instalación puede no ser igual a la demanda en capacidad.

A continuación se presenta la formulación del modelo de programación lineal (PL) planteado por los autores:

$$\text{Min } Z = 10 * X_a[W] + 30 * X_b[W] + 50 * X_c[W] + 20 * X_a[C] + 40 * X_b[C] + 50 * X_c[C]$$

Donde Z se refiere al costo total de la distribución de los productos A, B y C a través del almacén y el centro de crossdock; X_a , X_b y X_c se refieren la cantidad de espacio asignado a los productos A, B, y C, ya sea mediante la bodega de almacenamiento o el crossdock.

La solución está sujeta a las restricciones de capacidad, por ejemplo,

$$X_a[W] + X_b[W] + X_c[W] \leq 350$$

$$X_a[C] + X_b[C] + X_c[C] \leq 150$$

y las restricciones de demanda tales como la demanda para el producto A que se debe cumplir,

$$X_a[W] + X_a[C] \geq 75$$

De acuerdo con los autores con un aumento en el número de productos y las restricciones, la búsqueda de una solución óptima para el problema anterior puede ser bastante difícil.

Por lo que se utiliza el método de aproximación de Vogel (VAM) y los métodos UV para producir un modelo equilibrado para la asignación de productos a crossdocking y a almacenamiento tradicional. El método de Aproximación de Vogel (VAM) y el Enfoque UV es una combinación de dos algoritmos utilizados para resolver problemas de programación lineal.

VAM puede ser utilizado para encontrar una buena solución factible, pero no garantiza que sea óptima. VAM resuelve el problema de programación lineal y el tiempo empleado en la ejecución del módulo VAM no crecerá exponencialmente cuando se añadan más productos y servicios, lo que hace el proceso de optimización más eficiente. Para comprobar si hay una solución óptima y cambios en el proceso de la solución si es necesario, se aplica el método de UV. El método de UV, en general, utiliza precios sombra de los costos de cada celda y las restricciones de espacio para comprobar si es necesario modificar una solución básica factible (SBF) para llegar a una solución óptima.

VM ofrece un conjunto de soluciones que permiten a un producto usar de ambas instalaciones (Cross Docking y almacenamiento tradicional). El primer algoritmo diseñado encuentra una BFS utilizando el VAM y luego comprueba e itera la solución factible utilizando el método UV.

A continuación se presenta la tabla 4, en la cual se comparan los metodos de ubicación de bienes utilizados para ambientes Cross Docking presentados anteriormente:

	(Vis & Roodbergen, 2008)	Heragu, Du, Mantel, & Schuur, 2005)	Li, Sim, Low, & Lim, 2008)
Objetivo	Minimizar la distancia total del recorrido en la instalación.	Minimizar tanto el costo anual de manejo de materiales como el costo anual de almacenar una unidad de carga de producto.	Minimizar el costo total de operaciones de la instalación y cumplir con la demanda durante un período de tiempo determinado.
Método de Solución	Algoritmo, en el cual se formula una red que incorpora las localizaciones de la puerta de carga y descarga en el muelle, las distancias de viaje y el espacio de almacenamiento disponibles en la instalación.	Modelo matemático y algoritmo heurístico que determinan en conjunto la asignación de productos a las áreas funcionales (Cross Docking, almacenamiento y envío) del almacén así como el tamaño de cada área a partir de datos suministrados.	Modelo matemático de programación lineal, método de aproximación de Vogel (VAM) y los métodos UV, por los que se indica cuántos productos deben asignarse a la bodega Cross Docking y cuantos a la bodega tradicional.
Resultados	El método es capaz de determinar la ubicación de almacenamiento de cargas en un centro Cross Docking, de tal manera que el tiempo de viaje se reduce al mínimo para el transporte de las cargas.	El modelo es eficiente ya que puede ser usado para solucionar problemas con 15000 productos, además resuelve dos problemas conjuntamente de tal manera que los costos anuales de manejo de materiales y los costos de almacenamiento son minimizados para todos los flujos de materiales.	Es eficiente ya que encuentra una solución básica factible para el modelo de programación lineal utilizando el método de aproximación de Vogel (VAM) y luego comprueba e itera la solución factible utilizando el método UV para hallar finalmente la solución óptima.

Tabla 4. Métodos de ubicación de bienes en ambientes Cross Docking
[Fuente: Elaboración propia]

7. CRITERIOS UTILIZADOS EN LOS MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO PARA LA UBICACIÓN DE PRODUCTOS EN CENTROS CROSS DOCKING.

Dando cumplimiento al segundo objetivo del trabajo de grado, en este capítulo se realiza una breve descripción de los criterios que se extrajeron al realizar la revisión bibliográfica y que por lo tanto se utilizarán en la elaboración de la estrategia propuesta.

Es de anotar que en los centros de almacenamiento tradicional donde los productos se almacenan por un período de tiempo más largo comparado con los centros Cross Docking, la dinámica es muy diferente. Por lo que muchos de los métodos o políticas de almacenamiento utilizados para almacenamiento tradicional no se pueden aplicar directamente a Cross Docking. Un ejemplo de lo anterior se da con el método de almacenamiento por volumen de ventas, ya que en Cross Docking no hay necesidad de distinguir los productos por frecuencia de demanda, debido a que cada unidad de carga llega y sale del mismo día, sin ningún procesamiento adicional (Vis & Roodbergen, 2008).

Sin embargo se pueden extraer algunos de los criterios que se utilizan en los métodos de almacenamiento tradicional para ser utilizados en una estrategia que sea aplicable en centros Cross Docking, los cuales se describen como síntesis de toda la bibliografía revisada. Entre estos criterios encontramos:

- **Distancia total de recorrido**

La distancia total de recorrido es la trayectoria que sigue el personal del almacén transportando el producto desde la puerta de llegada hasta el lugar de almacenamiento al que es asignado más, el tramo desde el lugar de almacenamiento hasta la puerta por donde se despacha el producto. La minimización de este criterio es tenido en cuenta en muchos de los métodos caracterizados debido a que brinda beneficios en minimización de costos y tiempo.

En Cross Docking este criterio es también importante ya que al lograr la minimización de la distancia total recorrida se gana tiempo, el cual es vital en estos sistemas.

- **Utilización del espacio disponible para almacenamiento**

La utilización adecuada del espacio disponible para almacenamiento permite que el espacio no se subutilice, en muchos de los métodos caracterizados se tiene como desventaja este criterio, cuando se designa un lugar de almacenamiento para un producto específico sin permitir que lo puedan usar otros tipos de producto si se encuentra disponible.

Al realizar una adecuada asignación de los lugares de almacenamiento a los productos se pueden obtener ventajas como requerimientos de espacio mínimos para almacenamiento y costos menores de almacenamiento, entre otros.

- **Costos de mantener inventarios**

Los costos de mantener inventarios están relacionados con la cantidad de inventario que se maneje dentro del almacén. Es decir entre más inventario se tenga los costos de mantener inventario serán más altos. Por lo que uno de los objetivos de muchos métodos es disminuir estos costos y por ende el inventario que se maneja dentro de la terminal.

En las terminales Cross Docking los productos se mantienen en inventario por cortos períodos de tiempo lo que garantiza que el tiempo de permanencia de dichos productos sea mínimo y por lo tanto se reduzcan los costos de mantener inventario.

- **Costos de transporte dentro del almacén**

Los costos de transporte son proporcionales a la distancia total recorrida, es decir al buscar disminuir las distancias totales de recorrido dentro de la terminal también se logra que los costos relacionados con estas distancias sean mínimos. Este criterio es tenido en cuenta en algunos métodos en los cuales se almacenan productos cerca de otros que son

complementarios o con características similares, entre otros. Donde la distancia se reduce, al igual que los costos asociados a ésta.

En un centro Cross Docking este es un criterio muy importante que hay que tener en cuenta ya que la minimización de costos es uno de los objetivos de dichos centros.

Los criterios anteriormente descritos serán tenidos en cuenta en el desarrollo de la propuesta metodológica, ya que mediante su aplicación se pueden obtener muchos beneficios en los Centros de almacenamiento Cross Docking.

8. PROPUESTA METODOLÓGICA

Con el fin de dar cumplimiento al segundo objetivo específico planteado al inicio del presente documento se eligió como estrategia de solución la programación lineal entera mixta que permite resolver problemas de optimización que consideran restricciones lineales y variables de número entero o de valor, a continuación se describe dicha propuesta:

8.1. METODOLOGÍA PROPUESTA

Se desarrolló un modelo matemático formulado para la asignación de lugares de almacenamiento a cada uno de los productos que ingresan a la terminal, en el cual se involucran características propias de las terminales Cross Docking, tales como el tiempo de permanencia de los productos y un mayor número de puertas tanto de carga como de descarga. Dichas características se reflejan a través de parámetros, variables de decisión, restricciones y una función objetivo (ver Ilustración 5).

Este modelo es aplicable a terminales Cross Docking con tolerancia al inventario temporal, es decir terminales mixtas como son conocidas en la literatura, debido a que en éstas se realiza la etapa de almacenamiento temporal pero también se permite el paso directo de los productos tal como sucede en las terminales puras, en las cuales los productos descargados pasan directamente a los camiones de carga en un corto instante de tiempo, eliminando completamente la etapa de almacenamiento temporal.

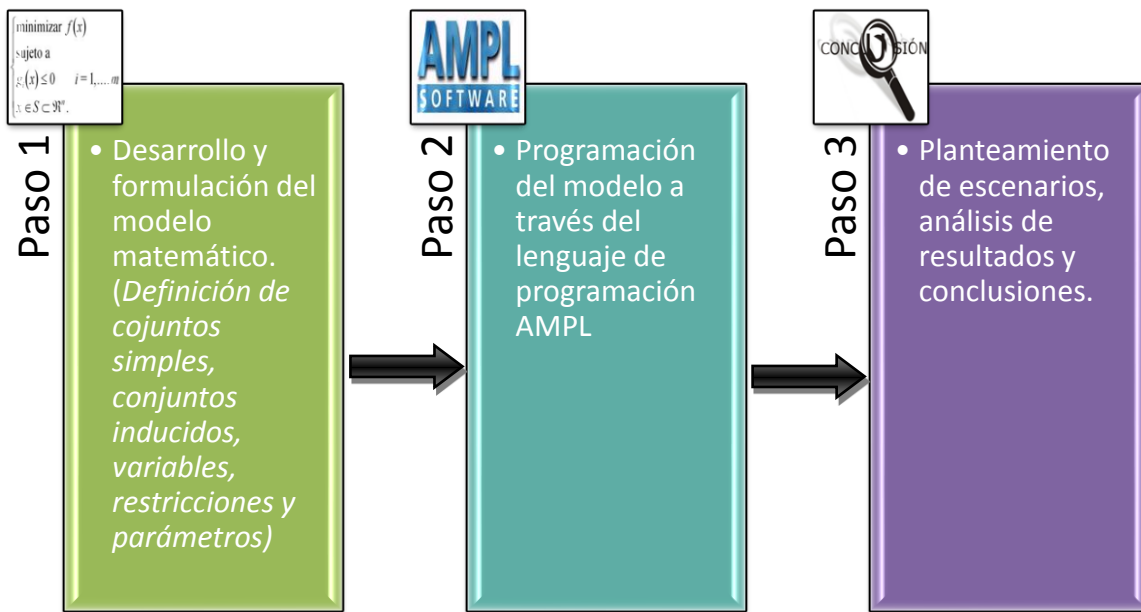


Ilustración 5. Metodología desarrollada para la asignación de lugares de almacenamiento a unidades de carga de productos.

[Fuente: Elaboración propia]

A continuación se realiza una detallada descripción del modelo de asignación con cada uno de los supuestos y resto de atributos que lo componen.

8.2. FORMULACIÓN DE LA ESTRATEGIA DE ASIGNACIÓN DE LUGARES DE ALMACENAMIENTO A UNIDADES DE CARGA DE PRODUCTOS EN CENTROS CROSS-DOCKING.

8.2.1. Supuestos

Para la elaboración de la estrategia de asignación se tienen en cuenta los siguientes supuestos:

- a. Se conoce la capacidad de cada lugar de almacenamiento y por lo tanto la capacidad de todo el centro de almacenamiento Cross Docking.

- b. La capacidad del centro de almacenamiento Cross Docking es limitada.
- c. La capacidad total de la instalación es suficiente para almacenar todas las unidades entrantes.
- d. Hay una distancia conocida entre la puerta de descarga y el lugar de almacenamiento.
- e. Hay una distancia conocida entre el lugar de almacenamiento y la puerta de carga.
- f. Existen dos tipos de lugares de almacenamiento, los tipo uno que corresponden a las localizaciones que se encuentran en el interior del centro Cross Docking (*en éstas los productos son almacenados temporalmente, por lo tanto se considera el inventario*) y los tipo dos que corresponden a las localizaciones ubicadas en las puertas de carga, es decir cuando el producto es transportado directamente desde la puerta de descarga hasta la puerta de carga. En este tipo no hay consideración de inventario ya que los camiones están ubicados en espera de ser despachados y no se permite obstaculizar el flujo de productos.
- g. Se conoce la cantidad de producto **p** que ingresa a la terminal en un camión (es), un camión de entrada puede contener uno o varios tipos de producto **p**.
- h. Un producto puede entrar por diferentes puertas de descarga en un mismo instante de tiempo.
- i. A un lugar de almacenamiento sólo se le puede asignar un tipo de producto en un instante de tiempo.
- j. Un producto puede ser asignado a varios lugares de almacenamiento debido a las limitaciones de capacidad de cada lugar.
- k. Se conocen los costos de transporte dentro de la terminal y los costos de mantener inventario.
- l. Se conoce la cantidad que sale del producto **p** dentro de la terminal en cada camión (es), el camión de salida puede contener uno o varios tipos de producto **p**.
- m. Un producto puede salir por diferentes puertas de carga en un mismo instante de tiempo.
- n. Las cantidades de producto **p** que entran y salen de la terminal son consideradas en unidades de carga.

8.3. NOTACIÓN Y DEFINICIÓN

Índices

p: Índice de productos

d: Índice de puertas de descarga

a: Índice de lugares de almacenamiento

j: Índice de tipos de lugares de almacenamiento

c: Índice de puertas de carga

t: Índice de periodos de tiempo

Conjuntos

PR: Conjunto de productos $PR = \{1 \dots np\}$ contiene los índices p .

PD: Conjunto de puertas de descarga $PD = \{1 \dots nd\}$ contiene los índices d .

LA: Conjunto de lugares de almacenamiento $LA = \{1 \dots na\}$ contiene los índices a .

PC: Conjunto de puertas de carga $PC = \{1 \dots nc\}$ contiene los índices c .

PT: Conjunto de periodos de tiempo $PT = \{1 \dots tt\}$ contiene los índices t .

TL: Conjunto de tipos de lugares de almacenamiento $TL = \{1 \dots ta\}$ contiene los índices j .

Conjunto Inducido

TipLoc[TL]: Conjunto de localizaciones tipo j , el cual incluye las localizaciones tipo 1 y las localizaciones tipo 2.

Parámetros

na : Número total de localizaciones.

np : Número total de productos.

nd : Número total de puertas de descarga.

nc : Número total de puertas de carga.

tt : Número total de periodos de tiempo.

ta : Número total de tipos de localizaciones.

le_{da} : Distancia desde la puerta de descarga d hasta el lugar de almacenamiento a (m).

ls_{ac} : Distancia desde el lugar de almacenamiento a hasta la puerta de carga c (m).

kt : Capacidad total del centro de almacenamiento Cross Docking (*unidades de carga*).

kl_a : Capacidad del lugar de almacenamiento a . (*unidades de carga*).

ql_{pdt} : Cantidad de producto p que llega a la puerta de descarga d en el tiempo t .

qs_{pct} : Cantidad del producto p que sale por la puerta de carga c en el tiempo t .

ip_{pa} : Inventario inicial del producto p en el lugar de almacenamiento a en el tiempo t .

it_p : Inventario inicial total del producto p en toda la terminal.

cl_p : Costo de transportar la carga del producto p por metro.

ci_{pa} : Costo de inventariar el producto p por unidad de carga en el lugar de almacenamiento a .

M : Número muy grande

Variables de decisión

$$BL_{pdat} = \begin{cases} 1, & \text{Si el producto } p \text{ que ingresa por la puerta de descarga } d \text{ se asigna al lugar} \\ & \text{de almacenamiento } a, \text{ en el tiempo } t. \\ 0, & \text{de lo contrario.} \end{cases}$$

$$BS_{pact} = \begin{cases} 1, & \text{Si el producto } p \text{ que fue asignado al lugar de almacenamiento } a \text{ sale} \\ & \text{por la puerta de carga } c \text{ en el tiempo } t. \\ 0, & \text{de lo contrario.} \end{cases}$$

$$BI_{pat} = \begin{cases} 1, & \text{Si el inventario final del producto } p \text{ es mayor que cero en el lugar de} \\ & \text{almacenamiento } a, \text{ en el tiempo } t. \\ 0, & \text{de lo contrario.} \end{cases}$$

QE_{pdat} : Cantidad transportada del producto p desde la puerta d , hasta el lugar de almacenamiento a , en el tiempo t .

QS_{pact} : Cantidad transportada del producto p desde el lugar de almacenamiento a , hasta la puerta de carga c , en el tiempo t .

FP_{pat} : Inventario final del producto p , en el lugar de almacenamiento a , en el tiempo t .

FT_{pt} : Inventario final del producto p , en toda la terminal, en el tiempo t .

8.4. FORMULACIÓN VERBAL DEL MODELO

8.4.1. Función objetivo

Minimizar:

Costos de transportar desde la puerta de descarga d , hasta el lugar de almacenamiento a y desde el lugar de almacenamiento a , hasta la puerta de carga c , todas las unidades de carga que ingresan al centro Cross Docking.

Más los costos de mantener en inventario todas las unidades de carga que se almacenan en los lugares de almacenamiento durante todos los periodos de tiempo.

8.4.2. Restricciones

1. Restricción de inventario de sólo un tipo de producto p en cada lugar de almacenamiento a en el tiempo t .
2. Definición de la cantidad que llega del producto p , por la puerta d , en el tiempo t .
3. Restricción de la suma los productos p , que ingresan por la puerta d y se asignan al lugar de almacenamiento a , es menor que el número de lugares de almacenamiento a , por el número de puertas de descarga d .
4. Restricción de lugares de almacenamiento a , con inventario del producto p , en el tiempo t , menor al número total de lugares de almacenamiento a .

5. Restricción de la cantidad transportada que entra del producto p , a el lugar de almacenamiento a en el tiempo t menor a la capacidad del lugar de almacenamiento a .
6. Restricción que activa la binaria de salida cada que se transporte producto p , desde el lugar de almacenamiento a hasta la puerta de carga c , en el tiempo t .
7. Definición de la cantidad que sale del producto p , por la puerta c , en el tiempo t .
8. Restricción de la cantidad que entra del producto p , por la puerta d en el tiempo t igual a la cantidad que sale del producto p por la puerta c en el tiempo t , sólo para las localizaciones **tipo 2**.
9. Definición del inventario final del producto p , en cada lugar de almacenamiento **tipo 2**, en el tiempo t .
10. **(a,b)** Definición del inventario final del producto p , en cada lugar de almacenamiento a , para el tiempo $t=1$ y para $t > 1$.
11. **(a,b)** Definición del inventario final del producto p en el tiempo $t=1$ y $t > 1$, en el centro Cross Docking.
12. Restricción de activación de variables de inventario BI_{pat} , cuando el inventario final del producto p en el lugar de almacenamiento a en el tiempo t , es mayor que cero, además garantiza que inventario final del producto p en el lugar de almacenamiento a menor a la capacidad de la localización a .

13. Restricción para garantizar la asignación de un sólo tipo de producto p en la misma localización a , en el tiempo t .
14. Restricción para garantizar que no se asigne el producto $p2$ en la localización a , si en dicha localización hay inventario del producto $p1$ en el tiempo t .
15. Restricción que garantiza que el producto p proveniente de todas las puertas de descarga d , asignado al lugar de almacenamiento a , en el momento de tiempo t sea menor o igual a los lugares de almacenamiento a asignados al producto p en el tiempo t por el número de puertas de descarga.
16. Obvias

8.5. Formulación matemática

Función objetivo

$$\begin{aligned} \text{Min} \left(\sum_{p \in PR} \sum_{d \in PD} \sum_{a \in LA} \sum_{t \in PT} cl_p (le_{da} \times BL_{pdat}) + \sum_{p \in PR} \sum_{a \in LA} \sum_{c \in PC} \sum_{t \in PT} cl_p (ls_{ac} \times BS_{pact}) \right) \\ + \left(\sum_{p \in PR} \sum_{a \in LA} \sum_{t \in PT} ci_{pa} \times FP_{pat} \right) \end{aligned}$$

El propósito de la función objetivo es minimizar los costos de transporte dentro del centro Cross Docking y los costos de mantener en inventario unidades de carga de los productos, de tal manera que los productos sean almacenados en el lugar de almacenamiento con la distancia más corta entre las puerta de entrada y salida simultáneamente y el tiempo de permanencia del producto sea mínimo.

Restricciones

- 1- Esta restricción garantiza que solo puede haber inventario de un solo tipo de producto p , en la localización a , en el tiempo t .

$$\sum_{p \in PR} BI_{pat} \leq 1 \quad \forall (a \in LA), \forall (t \in PT) \quad (1)$$

- 2- Esta restricción define que la cantidad de producto p , que llega a la puerta de descarga d , en el tiempo t es igual a la suma de todas las cantidades que se transportan del producto p , desde la puerta de descarga d , hacia los lugares de almacenamiento a , en el tiempo t .

$$ql_{pdt} = \sum_{a \in LA} QE_{pdat} \quad \forall (p \in PR), \forall (d \in PD), (t \in PT) \quad (2)$$

- 3- Esta restricción garantiza que la suma de los productos p , proveniente de la puerta de descarga d , los cuales fueron asignados a los lugares de almacenamiento a , en el momento de tiempo t , debe ser menor o igual al número de lugares de almacenamiento por el número de puertas. Lo que se traduce que un mismo tipo de producto puede entrar por diferentes puertas y ser ubicado en el mismo lugar de almacenamiento si hay espacio disponible.

$$\sum_{p \in PR} \sum_{d \in PR} \sum_{a \in LA} BL_{pdat} \leq na * nd \quad \forall (t \in PT) \quad (3)$$

- 4- Esta restricción garantiza que la suma de todos los lugares de almacenamiento a que cuentan con inventario del producto p en el tiempo t , debe ser menor o igual al número total de lugares de almacenamiento.

$$\sum_{p \in PR} \sum_{a \in LA} BI_{pat} \leq na \quad \forall (t \in PT) \quad (4)$$

- 5- Esta restricción garantiza que la cantidad de producto p transportado desde la puerta de descarga d , hacia el lugar de almacenamiento a , en el tiempo t , debe ser menor o igual a la capacidad del lugar de almacenamiento a .

$$QE_{pdat} \leq BL_{pdat} \times kl_a \quad \forall (p \in PR), \forall (d \in PD), (a \in LA), (t \in PT) \quad (5)$$

- 6- Esta restricción garantiza que si sale una unidad del producto p , del lugar de almacenamiento a , hacia la puerta de carga c , en el tiempo t , se active la binaria de salida BS_{pact} , es decir que cada que exista un flujo entre el lugar de almacenamiento a y la puerta de carga c , esta variable toma el valor de uno (1).

$$QS_{pact} \leq BS_{pact} \times kl_a \quad \forall (p \in PR), (a \in LA), \forall (c \in PC), (t \in PT) \quad (6)$$

- 7- Esta restricción define que la cantidad de producto p que sale por la puerta de carga c en el tiempo t es igual a la suma de las cantidades transportadas del producto p , desde todos los lugares de almacenamiento, hasta la puerta de carga c , en el tiempo t .

$$\sum_{a \in LA} QS_{pact} = qs_{pct} \quad \forall (p \in PR), \forall (c \in PC), \forall (t \in PT) \quad (7)$$

- 8- Esta restricción garantiza que la suma de las cantidades transportadas de producto p desde la puerta de descarga d , hacia la localización a , en el tiempo t , es igual a la suma de las cantidades transportadas del producto p desde la localización a hacia la puerta de carga c , en el tiempo t . Sólo para las localizaciones **tipo 2**, es decir que si en un momento t se requiere en la puerta de carga c la cantidad que entra por la puerta de descarga d , dicha cantidad debe pasar directamente de puerta a puerta sin consideración de almacenamiento temporal.

$$\sum_{d \in PD} QE_{pdat} = \sum_{c \in PC} QS_{pact} \quad \forall (p \in PR), \forall (a \in TipLoc[2]), \forall (t \in PT) \quad (8)$$

9- Esta restricción define el inventario final del producto **p**, en los lugares de almacenamiento **tipo 2**, en el tiempo **t**. Para este tipo de lugares no se considera inventario debido a que estos corresponden a las puertas de carga y éstas deben garantizar un flujo adecuado de productos para los diferentes períodos de tiempo.

$$FP_{pat} = 0 \quad \forall (p \in PR), \forall (a \in TipLoc[2]), (t \in PT) \quad (9)$$

10- (a,b) Estas restricciones definen el inventario final del producto **p**, en el lugar de almacenamiento **a**, tanto para el tiempo **t=1** como para **t > 1**

$$FP_{pat} = ip_{pa} + \sum_{d \in PD} QE_{pdat} - \sum_{c \in PC} QS_{pact}, \quad \forall (p \in PR), \forall (a \in LA), (t = 1) \quad (10a)$$

$$FP_{pat} = FP_{pa(t-1)} + \sum_{d \in PD} QE_{pdat} - \sum_{c \in PC} QS_{pact} \quad \forall (p \in PR), \forall (a \in LA), (t > 1) \quad (10b)$$

11- (a,b) Esta restricción define el inventario final del producto **p** en todo el centro Cross Docking tanto para el tiempo **t=1** como para **t > 1**.

$$FT_{pt} = it_p + \sum_{d \in PD} ql_{pdt} - \sum_{c \in PC} qs_{pct}, \quad \forall (p \in PR), (t = 1) \quad (11a)$$

$$FT_{pt} = FT_{p(t-1)} + \sum_{d \in PD} ql_{pdt} - \sum_{c \in PC} qs_{pct} \quad \forall (p \in PR), (t > 1) \quad (11b)$$

12- Esta restricción garantiza que la variable BI_{pat} tome el valor de uno si hay inventario final del producto p , en el lugar de almacenamiento a , en el tiempo t y tome el valor de cero en caso contrario. Esta restricción también garantiza que el inventario final del producto p , en la localización a , en el tiempo t , debe ser menor o igual a la capacidad de la localización a .

$$FP_{pat} \leq (BI_{pat}) \times kl_a \quad \forall (p \in PR), \forall (a \in LA), (t \in PT) \quad (12)$$

13- Esta restricción garantiza que no se asigne a una localización a , dos productos $p1$ y $p2$ que entren por la puerta de descarga $d1$ y $d2$, en el tiempo t .

$$BL_{p1d1at} + BL_{p2d2at} \leq 1 \\ \forall (p_1 \in PR), \forall (p_2 \in PR), \forall (d1 \in PD), \forall (d2 \in PD), \forall (a \in LA), \\ (t \in PT), \quad p_1 <> p_2 \quad (13)$$

14- Esta restricción garantiza que se no se asigne un producto $p2$, al lugar de almacenamiento a , si en el período de tiempo anterior hay inventario del producto $p1$ en el lugar de almacenamiento a , sin embargo este permite que se asigne a la misma localización a , el mismo producto $p1$ en el caso que el inventario final del producto no supere la capacidad de dicho lugar.

$$BL_{p2dat} \leq (1 - BI_{p1a(t-1)})M \quad \forall (p_1 \in PR), \forall (p_2 \in PR), \forall (d \in PD), \forall (a \in LA), \\ (t \in PT), \quad p_1 <> p_2 \quad (14)$$

15- Esta restricción garantiza que el producto p proveniente de todas las puertas de descarga d , asignado al lugar de almacenamiento a , en el momento de tiempo t sea menor o igual a los lugares de almacenamiento a asignados al producto p en el tiempo

t por el número de puertas de descarga. Esto se debe a que un producto p puede entrar por diferentes puertas de descarga d en el mismo tiempo t .

$$\sum_{d \in PD} BL_{pdat} \leq BI_{pat} \times nd \quad \forall (p \in PR), \forall (a \in LA), \forall (t \in PT), (15)$$

16- Obvias

Binarias

Las restricciones obvias aseguran que los valores de las matrices sean únicamente *ceros (0)* y *unos (1)*.

BL_{pdat} = Binaria

BS_{pact} = Binaria

BI_{pat} = Binaria

Enteras

Las restricciones obvias me aseguran que los valores de las matrices de las variables sean únicamente *valores enteros*.

QS_{pact} = Entera

FP_{pat} = Entera

FT_{pt} = Entera

A continuación se presenta el modelo matemático con su función objetivo y las restricciones que le componen:

$$FO = \text{Min} \left(\sum_{p \in PR} \sum_{d \in PD} \sum_{a \in LA} \sum_{t \in PT} cl_p * (le_{da} \times BL_{pdat}) + \sum_{p \in PR} \sum_{a \in LA} \sum_{c \in PC} \sum_{t \in PT} cl_p * (ls_{ac} \times BS_{pact}) \right) \\ + \left(\sum_{p \in PR} \sum_{a \in LA} \sum_{t \in PT} ci_{pa} \times FP_{pat} \right)$$

Restricciones

$$\sum_{p \in PR} BI_{pat} \leq 1 \quad \forall (a \in LA), \forall (t \in PT) \quad (1)$$

$$ql_{pdt} = \sum_{a \in LA} QE_{pdat} \quad \forall (p \in PR), \forall (d \in PD), (t \in PT) \quad (2)$$

$$\sum_{p \in PR} \sum_{d \in PR} \sum_{a \in LA} BL_{pdat} \leq na * nd \quad \forall (t \in PT) \quad (3)$$

$$\sum_{p \in PR} \sum_{a \in LA} BI_{pat} \leq na \quad \forall (t \in PT) \quad (4)$$

$$QE_{pdat} \leq BL_{pdat} \times kl_a \quad \forall (p \in PR), \forall (d \in PD), (a \in LA), (t \in PT) \quad (5)$$

$$QS_{pact} \leq BS_{pact} \times kl_a \quad \forall (p \in PR), (a \in LA), \forall (c \in PC), (t \in PT) \quad (6)$$

$$\sum_{a \in LA} QS_{pact} = qs_{pct} \quad \forall (p \in PR), \forall (c \in PC), \forall (t \in PT) \quad (7)$$

$$\sum_{d \in PD} QE_{pdat} = \sum_{c \in PC} QS_{pact} \quad \forall (p \in PR), \forall (a \in TipLoc[2]), \forall (t \in PT) \quad (8)$$

$$FP_{pat} = 0 \quad \forall (p \in PR), \forall (a \in TipLoc[2]), (t \in PT) \quad (9)$$

$$FP_{pat} = ip_{pa} + \sum_{d \in PD} QE_{pdat} - \sum_{c \in PC} QS_{pact}, \quad \forall (p \in PR), \forall (a \in LA), (t = 1) \quad (10a)$$

$$FP_{pat} = FP_{pa(t-1)} + \sum_{d \in PD} QE_{pdat} - \sum_{c \in PC} QS_{pact} \quad \forall (p \in PR), \forall (a \in LA), (t > 1) \quad (10b)$$

$$FT_{pt} = it_p + \sum_{d \in PD} ql_{pdt} - \sum_{c \in PC} qs_{pct}, \quad \forall (p \in PR), (t = 1) \quad (11a)$$

$$FT_{pt} = FT_{p(t-1)} + \sum_{d \in PD} ql_{pdt} - \sum_{c \in PC} qs_{pct} \quad \forall (p \in PR), (t > 1) \quad (11b)$$

.

$$FP_{pat} \leq (BI_{pat}) \times kl_a \quad \forall (p \in PR), \forall (a \in LA), (t \in PT) \quad (12)$$

$$BL_{p1d1at} + BL_{p2d2at} \leq 1 \quad \forall (p_1 \in PR), \forall (p_2 \in PR), \forall (d1 \in PD), \forall (d2 \in PD), \forall (a \in LA), (t \in PT), \\ p_1 <> p_2 \quad (13)$$

$$BL_{p2dat} \leq (1 - BI_{p1(t-1)})M \quad \forall (p_1 \in PR), \forall (p_2 \in PR), \forall (d \in PD), \forall (a \in LA), \\ (t \in PT), p_1 <> p_2 \quad (14)$$

$$\sum_{d \in PD} BL_{pdat} \leq BI_{pat} \times nd \quad \forall (p \in PR), \forall (a \in LA), \forall (t \in PT) \quad (15)$$

(16) Obvias

Binarias

BL_{pdat} = Binaria

BS_{pact} = Binaria

BI_{pat} = Binaria

Enteras

$\mathbf{QS}_{\text{pact}} = \text{Entera}$

$\mathbf{FP}_{\text{pat}} = \text{Entera}$

$\mathbf{FT}_{\text{pt}} = \text{Entera}$

9. APLICACIÓN DE LA PROPUESTA METODOLÓGICA AL CASO DE ESTUDIO

Con el fin de validar la propuesta metodológica planteada y de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada en los capítulos 4, 5 y 7, se propone un caso para analizar el desempeño de esta metodología en una terminal Cross-docking, con características que permitan representar en cierta medida a las terminales reales.

GENERALIDADES

- Se considera una terminal con un diseño simétrico, es decir igual número de puertas de carga y descarga. (2 puertas de carga y 2 puertas de descarga)
- Tres (3) lugares de almacenamiento (situados frente cada par de puertas de carga y descarga)
- Todos los lugares de almacenamiento tienen la misma capacidad a excepción de los lugares de almacenamiento ubicados en las puertas de carga, cuya capacidad es igual a la capacidad del camión.
- Los productos se almacenan en el suelo (un nivel), donde se puede acceder a ellos directamente.
- Se tienen suficientes recursos para atender la descarga y la carga de los camiones entrantes y salientes. Esto debido a que se tiene una programación de los camiones entrantes y salientes en la cual se ha tenido en cuenta la disponibilidad de los recursos del Centro Cross Docking.
- La capacidad de los recursos para transportar los productos desde la puerta de descarga al lugar de almacenamiento y desde el lugar de almacenamiento hasta la puerta de carga es suficiente para que sólo se realice un viaje en cada sentido. (*Unitarización de carga*)
- Los camiones traen y llevan las unidades al centro.

9.1. DATOS

9.1.1. La terminal

En la tabla 5, se mencionan las características propias de la terminal *Cross-docking*, que si bien no es una terminal exclusiva para esta labor, el sistema *Cross-docking* juega una papel importante para su desempeño. Ver ilustración 6

Puertas de Descarga	Se consideran dos (2) puertas de descarga de los camiones.
Puertas de Carga	Dos (2) puertas de carga de camiones de salida.
Número de localizaciones	Se consideran cinco (5) localizaciones, tres (3) tipo 1 y dos (2) tipo 2.
Capacidad localizaciones Tipo 1.	20 unidades de carga
Capacidad localizaciones Tipo 2	30 unidades de carga equivalentes a 30 <i>pallets</i> de 1,0 x 1,20 mts. Estas mismas unidades de carga corresponden a capacidad de carga de un camión de largo 15.25, ancho 2.45, y altura 2.6 mts.) (Group, 2010)
Capacidad de la terminal	140 unidades de carga
Tipo de productos manejados	3 tipos de productos. P1, P2, P3
Periodos de tiempo t	T1, T2, T3, T4

Tabla 5. Características de la terminal Cross Docking.

[Fuente: Elaboración propia]

9.1.2. Las Distancias

En las siguientes tablas 6 y 7 se detallan los parámetros de las distancias le_{da} y ls_{ca} , los cuales representan la distancia en metros desde la puerta de descarga hasta el lugar de almacenamiento y desde el lugar de almacenamiento hasta la puerta de carga respectivamente.

Lugar de almacenamiento <i>a</i>					
Puerta <i>d</i>	1	2	3	4	5
1	9,65	9,65	15,56	16,30	22,00
2	15,56	9,65	9,65	22,00	16,30

Tabla 6. Distancias desde la puerta de descarga *d* hasta el lugar de almacenamiento *a* (*m*).

[Fuente: Elaboración propia]

Puerta de carga <i>c</i>		
Lugar <i>a</i>	1	2
1	9,65	14,06
2	9,65	9,65
3	15,56	9,65
4	0,00	6,00
5	6,00	0,00

Tabla 7. Distancias desde el lugar de almacenamiento *a* hasta la puerta de carga *c* (*m*).

[Fuente: Elaboración propia]

9.1.3. Camiones de llegada y salida

En las siguientes tablas 8 y 9 se detallan las cantidades de cada tipo de producto que llegan en los camiones de entrada y se despachan en los camiones de salida. Tanto los camiones de entrada como los de salida tienen una capacidad de treinta (30) *pallets* y por lo general contienen más de 2 tipos de producto:

Camión	Instante de llegada (t)	Puerta de descarga (d)	Producto 1 (Unid. De carga)	Producto 2 (Unid. De carga)	Producto 3 (Unid. De carga)	Carga del camión de llegada
A	1	1	11	15	0	26
B	1	2	0	5	25	30
C	2	1	18	8	4	30
D	2	2	24	0	6	30
E	3	2	27	0	3	30
F	4	1	14	0	16	30
G	4	2	0	25	5	30

Tabla 8. Cantidad de producto **p** que llega por la puerta de descarga **d**.

[Fuente: Elaboración propia]

Camión	Instante de salida (t)	Puerta de carga (c)	Producto 1 (Unid. De carga)	Producto 2 (Unid. De carga)	Producto 3 (Unid. De carga)	Carga del camión de salida
A	1	1	0	9	20	29
B	2	1	4	9	8	21
C	2	2	0	10	7	17
D	3	2	27	0	3	30
E	4	1	26	0	0	26
F	4	2	28	0	0	28
G	4	2	0	25	5	30

Tabla 9. Cantidad de producto **p** que sale por la puerta de carga **c**.

[Fuente: Elaboración propia]

9.1.4. Costos de Transporte y Almacenamiento temporal

Con el fin de garantizar que los productos que entran a la terminal en los diferentes instantes de tiempo permanezcan el menor tiempo posible se penaliza el costo de mantener en inventario una unidad de carga el producto p en el lugar de almacenamiento a . Es de aclarar que para los lugares de almacenamiento tipo 2 el costo es menor comparado con el costo de los lugares de almacenamiento tipo 1.

Producto p	Lugar de almacenamiento a				
	Tipo 1			Tipo 2	
	1	2	3	4	5
1	190	190	190	15	15
2	200	200	200	20	20
3	120	120	120	30	30

Tabla 10. Costos de almacenar el producto p en el lugar de almacenamiento a (\$/unidad de carga)

[Fuente: Elaboración propia]

Tabla 11. Costo de metro de recorrido para

Producto p	Costo de Transporte (\$)
1	50
2	60
3	70

carga)

transportar una unidad de carga por cada producto p (\$/unidad de

[Fuente: Elaboración propia]

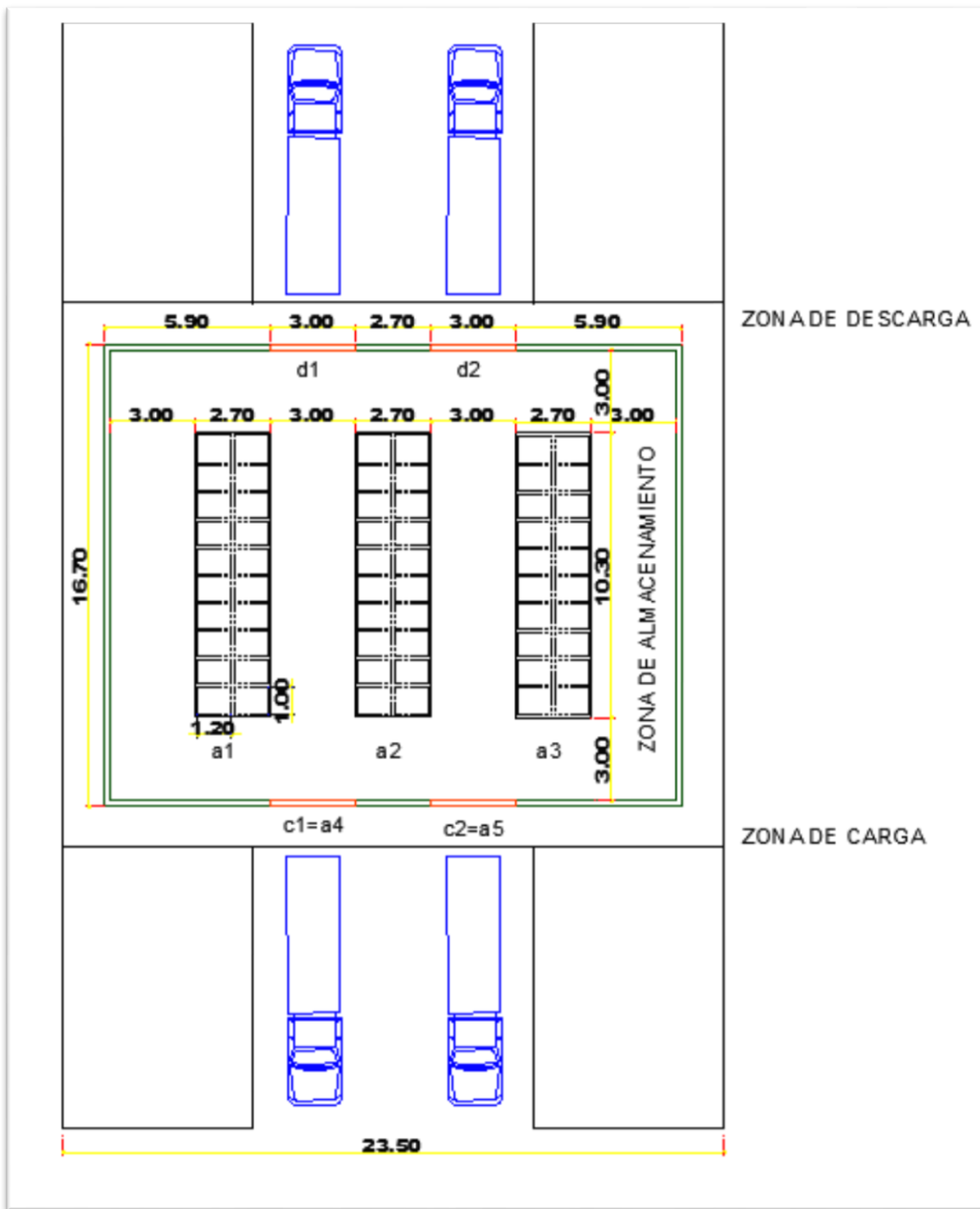


Ilustración 6. Diseño del centro Cross Docking - Caso de estudio

[Fuente: Elaboración propia]

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

10.1. IMPLEMENTACIÓN

Para la implementación de la metodología planteada, se utilizó el lenguaje de programación AMPL, en donde se cargaron los tres archivos, el primero denominado *Modelo_asignación.txt* en donde se describe la formulación matemática, el segundo de nombre *Datos_asignación.txt* en el cual se declaran los conjuntos simples, inducidos y los valores de los parámetros establecidos en el caso de estudio, y por último el archivo denominado *Comando_Asignación.txt* en el cual se declaran las variables que debe ejecutar dicho modelo. (Ver Anexo 1)

En la tabla 12 se muestra la asignación de lugares de almacenamiento a unidades de carga de productos arrojada por el lenguaje de programación AMPL a través del solver *CBC* utilizado para la programación lineal entera mixta, con el cual se obtuvo un costo de \$47375.5.

Del valor total de la función objetivo \$20.235,5 corresponden a los costos de transportar y \$27.140 corresponden a los costos de mantener inventario.

El problema tiene 463 variables: 289 variables binarias y 174 variables enteras. Para su solución se realizaron 7905 iteraciones, 111 nodos, y su tiempo computacional fue de 3.99439 segundos.

Orden de la Asignación	Producto p	Puerta de descarga d	Lugar de almacenamiento a (asignado)	Instante de tiempo t	Valor de la binaria de asignación (BL_{pdat})
<i>Primera</i>	1	1	1	1	1.0
<i>Segunda</i>	1	1	1	4	1.0
<i>Tercera</i>	1	1	2	2	1.0
<i>Cuarta</i>	1	2	2	2	1.0
<i>Quinta</i>	1	2	3	2	1.0
<i>Sexta</i>	1	2	4	3	1.0
<i>Séptima</i>	2	1	2	1	1.0
<i>Octava</i>	2	1	4	2	1.0
<i>Novena</i>	2	2	2	1	1.0
<i>Décima</i>	2	2	5	4	1.0
<i>Décima 1era</i>	3	1	2	4	1.0
<i>Décima 2nda</i>	3	1	5	2	1.0
<i>Décima 3era</i>	3	2	2	4	1.0
<i>Décima 4ta</i>	3	2	3	1	1.0
<i>Décima 5ta</i>	3	2	4	1	1.0
<i>Décima 6ta</i>	3	2	5	2	1.0
<i>Décima 7ma</i>	3	2	5	3	1.0

Tabla 12. Resultados de la variable de asignación
[Fuente: Elaboración propia]

En la tabla 12 se pueden ratificar los supuestos descritos en el capítulo 9, entre ellos el que a un lugar de almacenamiento sólo se le puede asignar un tipo de producto en un instante de tiempo, pero un producto sí puede ser asignado a varios lugares de almacenamiento debido a las limitaciones de capacidad de cada uno de los lugares, cumpliendo con la función objetivo. También se puede evidenciar la flexibilidad que tiene el modelo en cuanto a la entrada de productos por diferentes puertas en un mismo instante de tiempo tal como se muestran en el *tercer* y *cuarto* orden de asignación, en donde el producto 1 ingresa por la puerta 1 y por la puerta 2 en el instante de tiempo 2, sin embargo éste se asigna al mismo lugar de almacenamiento, puesto que este cuenta con capacidad.

En la tabla 13 se representan las cantidades de cada uno de los productos que fueron transportados desde las puertas de descarga hasta los lugares de almacenamiento (según la asignación de la binaria BL_{pdat}) en cada uno de los instantes de tiempo, teniendo en cuenta las limitaciones de capacidades tanto de los lugares de almacenamiento **tipo 1** como de los **tipo 2**, como modo ilustrativo se puede evidenciar que en la *quinta* asignación se transportaron 20 unidades de carga del producto 1 al lugar de almacenamiento 3 las cuales corresponden a la capacidad máxima de ese lugar ya que este pertenece a los **tipo 1**. Por otro lado en la *sexta* asignación se transportaron 27 unidades de carga del producto 1 al lugar de almacenamiento 4 el cual pertenece a los lugares de almacenamiento **tipo 2**, además de ello el modelo está cumpliendo con la restricción que declara que si la cantidad que entra del producto p , por la puerta d en el tiempo t igual a la cantidad que sale del producto p por la puerta c en el tiempo t , asigne dicho producto a una de las localizaciones **tipo 2**.

Orden de la Asignación	Producto p	Puerta de descarga d	Lugar de almacenamiento a	Instante de tiempo t	Cantidad transportada al lugar de almacenamiento a (QE_{pdat})
<i>Primera</i>	1	1	1	1	11.0
<i>Segunda</i>	1	1	1	4	14.0
<i>Tercera</i>	1	1	2	2	18.0
<i>Cuarta</i>	1	2	2	2	4.0
<i>Quinta</i>	1	2	3	2	20.0
<i>Sexta</i>	1	2	4	3	27.0
<i>Séptima</i>	2	1	2	1	15.0
<i>Octava</i>	2	1	4	2	8.0
<i>Novena</i>	2	2	2	1	5.0
<i>Décima</i>	2	2	5	4	25.0
<i>Décima 1era</i>	3	1	2	4	16.0
<i>Décima 2nda</i>	3	1	5	2	4.0
<i>Décima 3era</i>	3	2	2	4	5.0
<i>Décima 4ta</i>	3	2	3	1	5.0
<i>Décima 5ta</i>	3	2	4	1	20.0
<i>Décima 6ta</i>	3	2	5	2	6.0
<i>Décima 7ma</i>	3	2	5	3	3.0

Tabla 13. Cantidad transportada del producto p hacia los lugares de almacenamiento a .
[Fuente: Elaboración propia]

De la misma manera en la tabla 14 se registran las cantidades de cada uno de los productos p que fueron transportados a las puertas de carga según los requerimientos de salida en los diferentes instantes de tiempo, ratificando una vez más el cumplimiento de la capacidad de cada uno de los lugares de almacenamiento y la equivalencia entre las unidades de carga que ingresan a la terminal y las que salen.

Orden de la Asignación	Producto p	Lugar de almacenamiento a	Puerta de carga c	Instante de tiempo t	Cantidad transportada a la puerta de carga c (Q_{Spact})
<i>Primera</i>	1	1	1	4	20.0
<i>Segunda</i>	1	2	1	2	4.0
<i>Tercera</i>	1	2	1	4	6.0
<i>Cuarta</i>	1	2	2	4	12.0
<i>Quinta</i>	1	3	2	4	16.0
<i>Sexta</i>	1	4	2	3	27.0
<i>Séptima</i>	2	2	1	1	9.0
<i>Octava</i>	2	2	1	2	1.0
<i>Novena</i>	2	2	2	2	10.0
<i>Décima</i>	2	4	1	2	8.0
<i>Décima 1era</i>	2	5	2	4	25.0
<i>Décima 2da</i>	3	2	2	4	5.0
<i>Décima 3era</i>	3	3	2	2	5.0
<i>Décima 4ta</i>	3	4	1	1	20.0
<i>Décima 5ta</i>	3	5	1	2	8.0
<i>Décima 6ta</i>	3	5	2	2	2.0
<i>Décima 7ma</i>	3	5	2	3	3.0

Tabla 14. Cantidad transportada del producto p desde el lugar de almacenamiento a hasta la puerta de carga c .

[Fuente: Elaboración propia]

10.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad se relaciona con la cuantificación de los efectos que se generan en la solución óptima al realizar cambios en los parámetros del modelo matemático.

Para el análisis de sensibilidad de las distintas instancias planteadas se decidió variar los parámetros de costos de transporte y los costos mantener inventario los cuales conforman la función objetivo, de la siguiente forma:

- **Variación de costos de transporte**

El parámetro cl_p (costo de transporte del producto p) se planteó en el caso de estudio inicialmente con un valor de 50, 60 y 70 pesos por cada uno de los productos respectivamente.

Para el análisis de sensibilidad del modelo propuesto frente a este parámetro, se decidió fijar el parámetro ci_{pa} (costo de mantener en inventario el producto p en el lugar de almacenamiento a) los cuales tienen el valor de 190, 200 y 120 pesos para cada uno de los productos respectivamente en las localizaciones tipo 1 y 15, 20 y 30 pesos para las localizaciones tipo 2. La variación del costo de transporte se realizó en porcentajes mayores al costo planteado en el caso de estudio tal como se muestra en la tabla 15.

Producto	Variación Costo de Transporte					
	0%	100%	200%	300%	400%	500%
1	50	100	150	200	250	300
2	60	120	180	240	300	360
3	70	140	210	280	350	420

Tabla 15. Variación positiva de los costos de transporte del producto p
[Fuente: Elaboración propia]

Al realizar la variación del parámetro de costo de transporte, se cargaron los archivos correspondientes en el lenguaje de programación AMPL, y se consolidaron los resultados obtenidos para la función objetivo, tal como se muestra en la tabla 16:

No. De prueba	Costo F.O	Variación Costo de Transportar	Variación costo F.O
0	\$ 47.375,50	0%	0%
1	\$ 67.611,00	100%	43%
2	\$ 87.846,50	200%	85%
3	\$ 108.082,00	300%	128%
4	\$ 128.317,50	400%	171%
5	\$ 148.553,00	500%	214%

Tabla 16. Resultados de la variación del costo de transporte
[Fuente: Elaboración propia]

De los anteriores resultados, se puede identificar que a medida que el costo de transporte se incrementa, se presenta un aumento en el valor de la función objetivo en una proporción menor al aumento del costo, ya que si se realiza un aumento del costo de 500% el porcentaje de aumento de la función objetivo es de 214% con un costo de \$ 148.553,00 (ver ilustración 7).

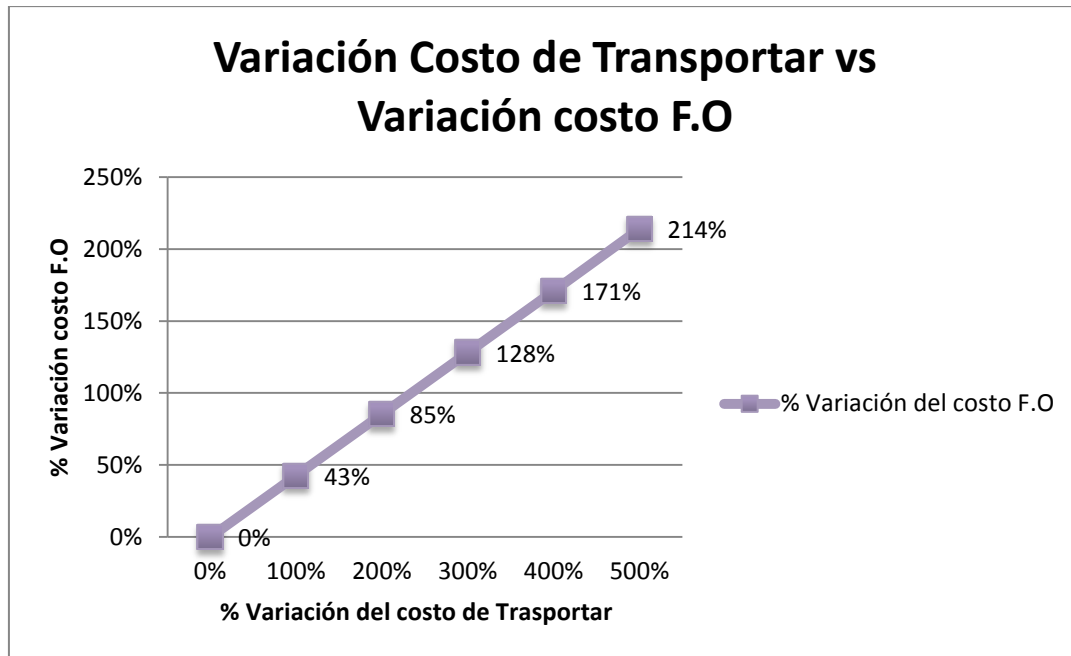


Ilustración 7. Variación costo de transporte vs variación Costo F.O
[Fuente: Elaboración propia]

- **Variación del costo de mantener inventario**

Consiste en variar el parámetro ci_{pa} (costo de mantener en inventario una unidad de carga del producto p en el lugar de almacenamiento a) de manera positiva, mantenimiento fijo el parámetro cl_p (costo de transporte de una unidad de carga del producto p , por metro recorrido), para esta instancia se debe tener en cuenta que los costos de mantener inventario son diferentes por cada tipo de localización ya que el costo de mantener inventario en las tipo 2 es mucho menor que el costo de mantener inventario en las tipo 1.

En las tablas 17 y 18 se muestran las correspondientes variaciones que se realizaron:

	Variación Costo de mantener en inventario una unidad de carga					
Producto <i>p</i>	0%	100%	200%	300%	400%	500%
1	190	380	570	760	950	1140
2	200	400	600	800	1000	1200
3	120	240	360	480	600	720

Tabla 17. Variación positiva del costo de mantener inventario para las localizaciones tipo 1.
[Fuente: Elaboración propia]

	Variación Costo de mantener en inventario una unidad de carga					
Producto <i>p</i>	0%	100%	200%	300%	400%	500%
1	15	30	45	60	75	90
2	20	40	60	80	100	120
3	30	60	90	120	150	180

Tabla 18. Variación positiva del costo de mantener inventario para las localizaciones tipo 2.
[Fuente: Elaboración propia]

Al realizar la variación del parámetro de costo de mantenimiento de inventario, se cargaron los archivos correspondientes en el lenguaje de programación AMPL, y se consolidaron los resultados obtenidos para la función objetivo, tal como se muestra en la tabla 19:

No. De prueba	Costo F.O	Variación Costo de mantener inventario	Variación costo F.O
0	\$ 47.375,50	0%	0%
1	\$ 74.515,50	100%	57%
2	\$ 101.655,50	200%	115%
3	\$ 129.209,20	300%	173%
4	\$ 155.935,50	400%	229%
5	\$ 183.075,50	500%	286%

Tabla 19. Resultados de la variación del costo de mantener el inventario
[Fuente: Elaboración propia]

De tabla 19 se puede inferir que la variación del costo de la función objetivo se realiza en menor proporción que la variación del costo de mantener inventario, ya que si se aumenta un

500% el valor del costo de mantener inventario, la función objetivo presenta un aumento del 286% con un costo de \$183.075,50.

En la ilustración 8 se puede observar las variaciones del costo de mantener inventario versus la variación que representa el costo de la función objetivo:

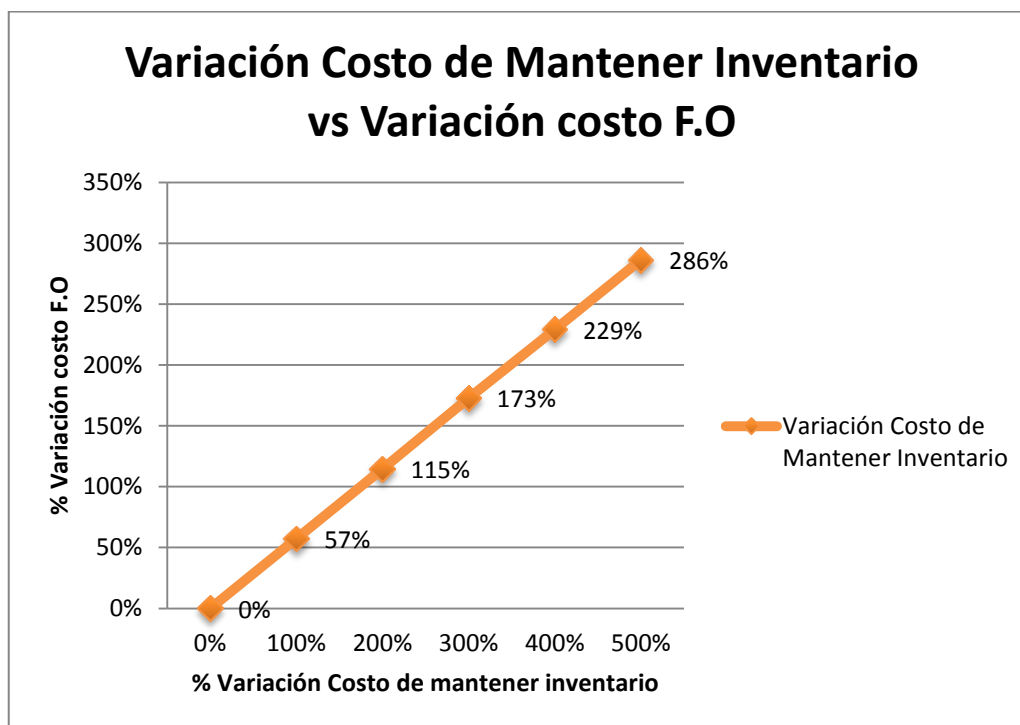


Ilustración 8. Variación positiva del costo de mantener inventario vs la variación del costo de la F.O
[Fuente: Elaboración propia]

- **Variación del número de localizaciones y del número de lugares**

Para esta instancia se aumentó tanto el número de productos como el número de lugares de almacenamiento, ya que la relación que existe entre estos parámetros es directamente proporcional debido a que un producto p solo puede ser almacenado en un lugar de almacenamiento a .

Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 20 a la 22:

Resultados del modelo con ocho (8) Localizaciones					
Nº de Productos	Valor F.O	Tiempo computacional (seg)	Tiempo computacional (hrs)	Nº de nodos	Nº de iteraciones
1	10715	0,074989	2,08303E-05	0	0
2	22731,6	4,706290	0,001307303	14	4406
3	36577,3	43,74340	0,012150944	462	54627
4	55790,2	112,1740	0,031159444	797	157288
5	71320,9	7635,32	2,120922222	42236	13834184

Tabla 20. Resultados del modelo con ocho (8) localizaciones

[Fuente: Elaboración propia]

Resultados del modelo con nueve (9) Localizaciones					
Nº de Productos	Valor F.O	Tiempo computacional (seg)	Tiempo computacional (hrs)	Nº de nodos	Nº de iteraciones
1	10715	0,099985	2,77736E-05	0	0
2	22731,6	4,706290	0,001307303	16	3455
3	36222,1	42,76750	0,011879861	662	79147
4	55240,6	183,7840	0,051051111	1065	251466

Tabla 21. Resultados del modelo con nueve (9) localizaciones

[Fuente: Elaboración propia]

Resultados del modelo con diez(10) Localizaciones					
No de Productos	F.O	Tiempo computacional (seg)	Tiempo computacional (hrs)	nodos	iteraciones
1	10715	0,07099	1,97194E-05	0	0
2	22731,6	6,360030	0,001766675	38	4893
3	36222,1	30,94830	0,00859675	469	46927
4	55051,9	69,62340	0,019339833	720	115898
5	66073,4	483,486	0,134301667	2967	900221

Tabla 22. Resultados del modelo con diez (10) localizaciones
[Fuente: Elaboración propia]

En las tablas 20-22 se muestra un resumen de los resultados de la instancia variando el número de localizaciones y al mismo tiempo el número de productos, se puede observar que a medida que el número de productos aumenta, para todos los casos el número de nodos, de interacciones y el tiempo computacional son mayores.

El valor de la función objetivo para uno y dos productos no sufre ninguna variación en los tres escenarios, esto se debe a que el modelo está transportando y almacenando uno o dos productos y aunque se tengan muchas localizaciones disponibles, el modelo escoge la mejor ya que no tiene restricciones para almacenar. Sin embargo para tres, cuatro o cinco productos el valor de la función objetivo empieza con algunas variaciones mínimas, esto se debe al aumento del número de productos, ya que las mejores localizaciones están ocupadas y por lo tanto el modelo debe elegir otra y esto ocasiona que el valor aumente para algunos casos o para los tres escenarios.

También se puede observar que a medida que el número de productos aumenta el valor de la función objetivo como se observa en la ilustración 9:

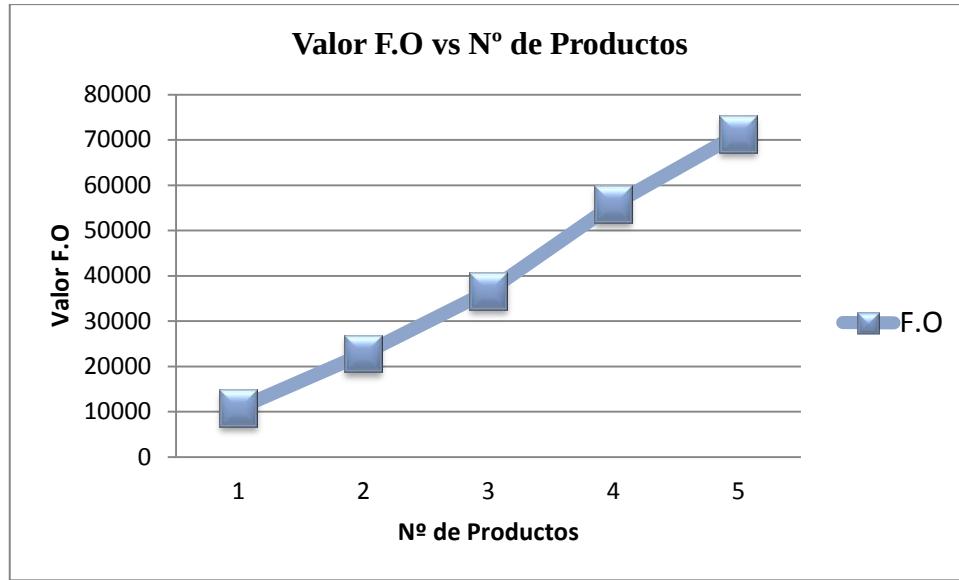


Ilustración 9. Valor Función Objetivo vs Variación número de Productos
[Fuente: Elaboración propia]

- **Penalización por uso de lugares de almacenamiento a**

Para este análisis se agregó un componente a la función objetivo planteada inicialmente, este es:

$$\sum_{p \in PR} \sum_{a \in LA} \sum_{t \in PT} FP_{pat} * cu_a$$

Donde ***FP_{pat}*** es la variable que indica la cantidad de inventario final del producto ***p***, en el lugar de almacenamiento ***a***, en el tiempo ***t***, y ***cu_a*** es un parámetro que representa el costo de utilizar el lugar de almacenamiento ***a***.

Para esta instancia se tuvieron en cuenta cinco (5) tipos de productos ***p***, ocho localizaciones ***a***, las localizaciones tipo 2 siguen siendo las mismas localizaciones del

caso de estudio (*localización 4 y localización 5*) y los valores para el parámetro cu_a se muestran en la siguiente tabla 23:

Lugar de almacenamiento a	Costo de uso del lugar a (cu_a)
1	\$ 20
2	\$ 15
3	\$ 20
4	\$ 5
5	\$ 5
6	\$ 25
7	\$ 15
8	\$ 25

Tabla 23. Costos de uso de cada lugar de almacenamiento a.
[Fuente: Elaboración propia]

Con el fin de conocer qué resultados se obtendría con este nuevo componente se actualizaron los datos y se subieron nuevamente al lenguaje de programación AMPL, el cual arrojó un costo de \$ **75.247,00** para la función objetivo y los siguientes resultados para la variable de asignación BL_{pdat} como se observa en la Tabla 24:

Orden de la Asignación	Producto p	Puerta de descarta d	Lugar de almacenamiento a (asignado)	Instante de tiempo t	Valor de la binaria de asignación (BL_{pdat})
Primera	1	1	8	1	1.0
Segunda	1	1	8	3	1.0
Tercera	1	1	8	4	1.0
Cuarta	1	2	8	2	1.0
Quinta	1	2	8	3	1.0
Sexta	2	1	1	1	1.0
Séptima	2	1	1	2	1.0
Octava	2	1	1	3	1.0
Novena	2	1	1	4	1.0
Décima	2	2	5	1	1.0
Décima 1era	2	2	1	4	1.0
Décima 2nda	2	2	1	3	1.0
Décima 3era	3	1	2	1	1.0
Décima 4ta	3	1	2	2	1.0
Décima 5ta	3	1	2	3	1.0
Décima 6ta	3	1	2	4	1.0
Décima 7ma	3	2	2	1	1.0
Décima 8va	3	2	2	2	1.0
Décima 9na	3	2	2	3	1.0
Vigésima 1era	3	2	2	4	1.0
Vigésima 2nda	4	1	4	1	1.0
Vigésima 3era	4	1	3	2	1.0
Vigésima 4ta	4	1	4	3	1.0
Vigésima 5ta	4	1	4	4	1.0
Vigésima 6ta	4	2	3	1	1.0
Vigésima 7ma	4	2	3	2	1.0
Vigésima 8va	4	2	3	3	1.0
Vigésima 9na	4	2	3	4	1.0
Trigésima	5	1	4	2	1.0
Trigésima 1era	5	1	6	3	1.0
Trigésima 2da	5	1	6	4	1.0
Trigésima 3era	5	2	7	1	1.0
Trigésima 4ta	5	2	5	2	1.0
Trigésima 5ta	5	2	5	3	1.0

Tabla 24. Resultados de la variable asignación de los productos
[Fuente: Elaboración propia]

De la tabla 24 se puede analizar cuáles fueron los lugares que presentaron mayor frecuencia de utilización en los diferentes instantes de tiempo, para mayor comprensión estos se resumen a continuación en la tabla 25:

Lugar de almacenamiento α	Frecuencia de asignación
1	6
2	8
3	5
4	4
5	3
6	2
7	1
8	5

Tabla 25. Resultados la frecuencia de asignación de los lugares a.
[Fuente: Elaboración propia]

De donde se puede concluir que las localizaciones que más se asignaron en los diferentes periodos de tiempo fueron la localización 1 y la 2 con una frecuencia de 6 y 8 respectivamente, esto debido a que estas son las que presentan menor costo con respecto a las otras localizaciones que tienen tolerancia de inventario.

11. CONCLUSIONES

- No todos los problemas que se enfrenta en el Cross Docking son ampliamente discutidos en el estado del arte. En la actualidad existen muy pocos trabajos sobre el almacenamiento temporal en este tipo de ambientes, aspecto que se convierte en una buena oportunidad para mejorar las operaciones que realizan en Cross-Docking, por ejemplo, los recorridos excesivos y la congestión.
- El Cross Docking como estrategia puede ser utilizado para todo tipo de productos, sin embargo esta tendría una mayor eficiencia sobre productos con variación de demanda constante, volumen alto, alto costo y ciclo de vida corto.
- La metodología planteada en esta investigación tiene dos objetivos principales, el primero es minimizar los costos asociados al inventario final de cada uno de los productos y el segundo minimizar los costos asociados a la distancias recorridas por unidad de carga, logrando de esta manera una reducción del tiempo de permanencia y una aceleración del flujo de los productos desde la recepción hasta el despacho.
- Este modelo logra obtener una adecuada utilización del espacio, ya que permite ubicar unidades de carga de un mismo producto en lugares que ya han sido asignados con anterioridad pero que tienen capacidad de almacenamiento disponible. Además permite al administrador del centro conocer el inventario de los productos en cada uno de los lugares de almacenamiento en el periodo de tiempo que desee, liberando los lugares de almacenamiento que no cuenten con inventario final de producto para que estos sean asignados nuevamente, lo que se traduce en una utilización adecuada del espacio designado para almacenar.
- El modelo de asignación que se presentó en esta investigación puede ser usado para diferentes casos de estudio en los cuales se puede variar el diseño del centro, el

número de puertas de descarga (entrada), número de puertas de carga (salida), el número de productos y el número de lugares de almacenamiento temporales, teniendo en cuenta que entre mayor sea el tamaño del modelo mayor será el tiempo computacional requerido para su solución o podría ser imposible de resolverse.

- Debido a que una de las principales limitantes para la optimización global de cualquier problema de asignación, es la complejidad computacional por el crecimiento exponencial del espacio de soluciones conforme crece el tamaño del problema para futuras investigaciones se pueden emplear técnicas heurísticas, con las cuales se puede dar solución a este inconveniente por medio de una búsqueda dirigida y eficiente en términos de tiempo computacional.
- Como resultado final de este trabajo de grado se obtuvo una correcta asignación de los lugares de almacenamiento temporales, es decir el modelo asignó las unidades de carga unitaria de cada producto (*desde la llegada de los productos a la puertas de descarga*) a los lugares de almacenamiento disponibles que presentaron una distancia más corta de desplazamiento y según los requerimiento de unidades carga que se definieron para cada producto en las puertas de salida, se extrajeron los productos que estuvieran en el lugar de almacenamiento más cercano a estas, de manera que los costos de transporte fueron mínimos para así cumplir con el objetivo de minimizar el valor de la función objetivo.
- La formulación matemática del modelo permite pasar directamente de puerta a puerta las unidades unitarias de los productos que requieren ser despachados en un mismo periodo de tiempo sin que se incurra en costo de almacenamiento, siendo esta una característica propia de una terminal Cross Docking – pura, y una muestra de flexibilidad del modelo presentado.
- El empleo de este tipo de herramientas, es de gran ayuda para los tomadores de decisiones, ya que les permite proyectar la evaluación del impacto de sus decisiones

con respecto a uno de los principales indicadores en los centros de distribución donde se maneja inventario, y más aún, cuando el centro de distribución es de tipo Cross Docking y su principal objetivo es reducir el tiempo de permanencia de los productos dentro de éstos.

12. ESTUDIOS FUTUROS

Como investigación futura se pueden considerar:

- Dado que el desarrollo de este trabajo de investigación, se realizó tomando las cantidades que entran a la terminal y las cantidades que salen como conocidas (determinístico) sería interesante ver el comportamiento de los resultados cuando se trabaja con un modelo estocástico o utilizando herramientas como la simulación.
- En este trabajo se tomó sólo el problema de asignación de lugares de almacenamiento temporales; puede ser interesante interrelacionar varios de los problemas planteados para el Cross Docking con los cuales se pueden obtener datos para la solución de este modelo como son el scheduling y la asignación de puertas.

13. BIBLIOGRAFÍA

Agustina, D., Lee, C., & Piplani, R. (2010). A Review: Mathematical Modles for Cross Docking Planning. *International Journal of Engineering Business Management* , 2 (2), 47-54.

Anaya Tejero, J. J. (2007). *Logística Integral: la gestión operativa de la empresa*. Madrid (España): ESIC.

Apte, U. M., & Viswanathan, S. (2000). Effective Cross Docking for Improving Distribution Efficiencies. *International Journal of Logistics* , 3 (3), 291-302.

Bartholdi III, J. J., & Gue, K. R. (2004). The Best Shape for a Crossdock. *Transportation Science* , 38 (2), 235–244.

Bartholdi III, J., & Hackman, S. (2011). *Warehouse and Distribution Science* (Release 0.94 ed.). Atlanta: The Supply Chain and Logistics Institute, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology.

Boysen, N. (2010). Truck Sheduling at zero- inventory Crossdocking Terminals. *Computers and Operations* , 37 (1), 32-41.

Boysen, N., & Flidner, M. (2010). Cross dock scheduling: Classification, literature review and research agenda. *Omega* , 38, 413-422.

Bravo, J. (2001). Operaciones en centros de distribución. *Manuscrito no publicado* .

De Koster, R., & Neuteboom, A. (2001). The Logistics of Supermarket Chains. *Elsevier, Doetinchem* .

Editor. (2001). Is just-in-time returning to just-in-case? *Mod. Mat. Handl.*

Frazelle, E. (2002). *Supply Chain Strategy: The Logistics of Supply Chain Management*. New York: McGraw-Hill, New York.

Galbreth, M. R., & Hill, J. A. (2008). An Investigation of the value of Cross docking for supply chain management. *Journal of Business Logistics* , 29 (1), 225-239.

García, S. J. (2007). *José P. García- Sabater*. Retrieved from http://jpgarcia.webs.upv.es/?page_id=16

- Goetschalckx, M., & Ratliff, H. (1990). Shared store policies based on the duration stay unit loads. *Management Science* , 36, 1120-1132.
- Group, L. (2010, Octubre). *Lantel Group On Line Digital*. Retrieved April 18, 2013, from www.segurosaduana.com/container.htm
- Gue, K. R. (1999). The Effects of Trailer Scheduling on the Layout of Freight Terminals. *Transportation Science* , 4 (33), 419-428.
- Hausman, W., Schwarz, L., & Graves, S. (1976). Optimal Storage assignment in automatic warehousing systems. *Management Science* , 22, 629-638.
- Heragu, S., Du, L., Mantel, R., & Schuur, P. (2005). Mathematical model for warehouse design and product allocation. *International Journal of Production Research* , 43 (2), 327–338.
- Herrera, A. (2007). Administración Logística. Piura: Universidad nacional de Piura. 72.
- Hompel, M., & Schmidt, T. (2007). Warehouse Management. Springer- Verlag Berlin Heidelberg.
- Koster, R. d., Le-Duc, T., & Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking:A literature review. *European Journal of Operational Research* , 182 (2), 481–501.
- Li, Z., Sim, C. H., Low, M. Y., & Lim, V. G. (2008). Optimal Product Allocation for Crossdocking and Warehousing Operations in FMCG Supply Chain. *Service Operations and Logistics, and Informatics. IEEE/SOLI. IEEE International Conference* , 2, 2963 - 2968.
- Mina, G. (2007). Almacenamiento de Objetos. *Servicio Nacional de Aprendizaje- SENA* . Bogotá.
- Palma Estrada, R. A. (2012). *Consortio de Bibliotecas Universitarias de El Salvador*. Retrieved Diciembre 3, 2012, from <http://hdl.handle.net/10972/527>
- PriceWaterHouseCoopers. (2001). Manual Práctico de Logística. Pilot.
- Ratliff, H., & Rosenthal, A. (1983). Order-picking in a rectangular warehouse: A solvable case of the traveling salesman problem. *Operations Research* , 31 (3), 507-521.
- Shaffer, B. (1997). Implementing a Succesful Crossdocking Operation. *IEE Solutions* , 4, 34-36.
- Van Belle, J., Valckenaers, P., & Cattrysse, D. (2012). Cross-docking:State of the art. *Omega* , 40 (6), 827–846.
- Vidal, C. J. (2010). Planeación, Optimización y Administración de Cadenas de Abastecimiento. *Universidad del Valle* .

Vis, F. I., & Roodbergen, K. J. (2008). Positioning of goods in a cross-docking environment. *Computers & Industrial Engineering* 54 , 677–689.

Yan, H., & Tang, S.-I. (2009). Pre-distribution and post-distribution cross-docking operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* , 45 (6), 843–859.

ANEXO 1

En la carpeta “otros documentos” incluida en este CD se anexan los siguientes archivos:

- ✓ Modelo de asignación en lenguaje AMPL:
 - Modelo_ asignación*.txt
 - Datos_ asignación*.txt
 - Comandos_ asignación*.txt
- ✓ Resultado de la corrida del modelo:
 - Resultados_ asignación*.txt
- ✓ Hojas de Excel:
 - Datos caso de estudio.xlsx
 - Grafica Variables del modelo.xlsx

- ✓ * El modelo en AMPL se resolvió en el solver cbc desde la pagina web <http://www.neos-server.org>.