

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un sistema de almacenamiento de materiales en un galpón para una
planta procesadora de acero

INGE-2472

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingenieras Industriales

Presentado por:

Cepeda Zea Mallerly Scarleth

Heras Castro Maria Emilia

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mi mami, quién es mi principal fuente de motivación, ejemplo de superación, esfuerzo y valentía.

A mi papi, que me ha brindado su apoyo de todas las formas posibles y siempre a querido lo mejor para mí.

A mí misma, por todos los años de arduo trabajo. Este proyecto es la evidencia de que con determinación y dedicación puedo cumplir todas mis metas.

Mallerly

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mi mami, la Lcda. Gina Castro, quien siempre estuvo a mi lado durante cada obstáculo, me dio todo el amor y apoyo que una madre puede ofrecer, este logro es suyo.

A mi papi, quien me acompañó desde el primer día de esta etapa y me brindó su ayuda incondicional.

Y por último a mi hermana, quien, durante estos 6 años, escucho cada situación de estrés y angustia con paciencia.

Emilia

Agradecimientos

A mis padres, por creer en mí, por brindarme palabras de consuelo y motivación en los momentos más difíciles.

A mi hermano, por ser mi apoyo incondicional.

A Emilia, con quién compartí casi toda mi carrera universitaria y finalizaremos esta etapa juntas. Gracias por tus esfuerzos y valentía.

A mis amigos que conocí desde el pre y en el transcurso de la carrera, por todos los momentos divertidos y estresantes que compartimos juntos.

Mallerly

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, en especial a mi madre, quien a pesar de su enfermedad me pidió que no pospusiera mis estudios y siguiera adelante.

A mi hermana, tías y abuelita, quienes en todo momento creyeron en mí y me dieron la fortaleza para continuar.

A mi enamorado Bryan, gracias por ser mi amigo desde primer semestre, por hacerme reír, acompañarme en el expreso y compartir esta experiencia conmigo.

Le agradezco a mi compañera, Mallerly, quien conocí desde segundo semestre y desde ahí no nos hemos separado, gracias por elegirme para concluir esta etapa.

Agradezco a mis amigos Luis, Francheska, José, Javiera, Dyllan, Melanie, Daniela, Mauricio y Josué, gracias por hacer mi experiencia universitaria más bonita.

Emilia

Declaración Expresa

Nosotros Mallerly Scarleth Cepeda Zea y Maria Emilia Heras Castro acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 20 de mayo del 2024



Mallerly Scarleth Cepeda Zea



Maria Emilia Heras Castro

Evaluadores

Sofia Anabel López Iglesias, MSc.

Profesora de Materia

María Laura Retamales García, MSc.

Tutora de proyecto

Resumen

La empresa especializada en la industria de acero en la cual se desarrolla este proyecto cuenta con una planta distribuida en galpones, donde se lleva a cabo la producción, almacenamiento y despacho de diferentes tipos de productos; estos siguen un tipo de almacenamiento caótico para la ubicación de los materiales, ocasionando que durante el picking el nivel de búsqueda sea deficiente y se generen retrasos que afectan la productividad de la cadena de abastecimiento.

Con el objetivo de incrementar la eficiencia de la cadena de abastecimiento, se implementó la metodología DMADV (Definir, Medir, Analizar, Diseñar, Verificar) para diseñar un sistema de almacenamiento de materiales con ubicaciones fijas que permitan reducir las distancias recorridas durante el picking.

El modelo de optimización desarrollado se basa en la clasificación ABC como política de inventario, priorizando los SKUs de alta rotación diaria, para que sean ubicados lo más cercano al andén de despacho.

La mínima distancia diaria recorrida en el picking aplicando el Storage Location Assignment Problem (SLAP) dio como resultado 4524.56 metros, reduciendo en un 18% la distancia respecto a la situación actual.

Palabras Clave: DMADV, Modelo de optimización, Picking, Sistema de almacenamiento de materiales, SLAP

Abstract

The company specialized in the steel industry in which this project is developed has a facility distributed in warehouses, where its produce, storage, and dispatch different types of steel products, having a chaotic storage for the allocation of materials, causing that during the picking process the searching levels are deficient, generating delays that affect the productivity of the supply chain.

With the aim to increase the supply chain efficiency, it was implemented the DMADV (Design, Measure, Analyze, Design, Verify) methodology to design a storage system for materials with fixed allocations that allow to reduce the distance traveled during the picking. The optimization model developed is based on the ABC classification as inventory police, prioritizing the SKUs of high daily rotation, in order to be located as closer as possible to the loading dock.

Le minimum distance daily traveled during the picking applying the Storage Location Assignment Problem (SLAP) provided a result of 4524.56 meters, reducing a 18% de distance respect to the actual situation.

Keywords: *DMADV, Material storage system, Optimization model, Picking, SLAP*

Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	V
Simbología.....	VI
Índice de figuras.....	VII
Índice de tablas.....	VIII
Capítulo 1.....	1
1. Introducción.....	2
1.1 Descripción del Problema.....	2
1.2 Justificación del Problema.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Marco Teórico.....	5
1.4.1 Definir, Medir, Analizar, Diseñar, Verificar (DMADV).....	5
1.4.2 Voice of Customer (VOC).....	5
1.4.3 Quality Function Deployment (QFD).....	6
1.4.4 Clasificación ABC.....	6
1.4.5 Gemba.....	6
Capítulo 2.....	7
2. Metodología.....	8
2.1 Definición.....	8
2.1.1 VOC.....	8
2.1.2 Alcance del proyecto.....	9
2.1.3 QFD.....	10
2.1.4 Especificaciones de diseño técnico.....	12
2.1.5 Restricciones de diseño.....	12
2.1.6 Métricas de sostenibilidad.....	13
2.2 Medición.....	14
2.2.1 Recolección de datos.....	14
2.2.2 Validación de los parámetros.....	17

2.3	Análisis	25
2.3.1	Situación actual	25
2.3.2	Opciones de diseño.....	27
2.3.3	Matriz de decisión	28
2.3.4	Análisis Financiero.....	28
2.4	Diseñar.....	30
Capítulo 3.....		35
3.	Resultados y análisis	36
3.1	Resultados del modelo.....	36
3.2	Resultados de las métricas de sostenibilidad	39
3.2.1	Pilar social.....	39
3.2.3	Pilar económico.....	39
3.2.4	Pilar ambiental.....	39
Capítulo 4.....		40
4.	Conclusiones y recomendaciones	41
4.1	Conclusiones.....	41
4.2	Recomendaciones	42
Referencias.....		43

Abreviaturas

DMADV	Definir, Medir, Analizar, Diseñar, Verificar
ERP	Enterprise Resource Planning
GB	Galvanizado
LC	Laminado Caliente
MIP	Mixed Integer Programming
QFD	Quality Function Deployment
SKU	Stock Keeping Unit
SLAP	Storage Location Assignment Problem
TBL	Triple Bottle Line
VOC	Voice of Customer

Simbología

h	Horas
Kg	Kilogramo
kW	Kilowatts
m	Metro
m ³	metro cubico
mm	Milímetro
TM	Tonelada métrica

Índice de figuras

Figura 1 <i>Promedio de ventas mensuales por grupo de producto</i>	2
Figura 2 <i>Despacho de tuberías por galpón de planta 3</i>	3
Figura 3 <i>Voz del cliente</i>	9
Figura 4 <i>Diagrama SIPOC</i>	10
Figura 5 <i>QFD</i>	11
Figura 6 <i>Gráfica de probabilidad del despacho mensual de tuberías en el galpón 2</i>	18
Figura 7 <i>Gráfica de probabilidad de las ventas mensuales de tuberías en el galpón 2</i>	19
Figura 8 <i>Layout del galpón</i>	22
Figura 9 <i>Ubicaciones disponibles para almacenamiento en el galpón 2</i>	23
Figura 10 <i>Número de ubicaciones específicas para almacenamiento en el galpón</i>	23
Figura 11 <i>Clasificación ABC</i>	26
Figura 12 <i>Ubicación actual de los materiales según clasificación ABC</i>	26
Figura 13 <i>Formulación en GAMS</i>	33
Figura 14 <i>Mapa de productos por categoría.</i>	37
Figura 15 <i>Vista superior de la simulación.</i>	37
Figura 16 <i>Simulación</i>	38
Figura 17 <i>Resultados del modelo</i>	38

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Plan de recolección de datos</i>	15
Tabla 2 <i>Despacho mensual de tuberías en el galpón 2</i>	17
Tabla 3 <i>Estadísticas descriptivas del despacho mensual de tuberías</i>	18
Tabla 4 <i>Prueba T para comparación de medias</i>	18
Tabla 5 <i>Venta mensual de tuberías del galpón 2</i>	19
Tabla 6 <i>Estadísticas descriptivas de la venta mensual de tuberías</i>	20
Tabla 7 <i>Prueba T para comparación de medias</i>	20
Tabla 8 <i>Ítems almacenados en el galpón 2</i>	20
Tabla 9 <i>Dimensiones de los SKUs</i>	21
Tabla 10 <i>Peso de los SKUs</i>	21
Tabla 11 <i>Cantidad de productos almacenados en el galpón 2</i>	22
Tabla 12 <i>Distancia recorrida para el picking</i>	24
Tabla 13 <i>Promedio de horas extras trabajadas por mes</i>	24
Tabla 14 <i>Especificaciones del puente grúa</i>	25
Tabla 15 <i>Tiempo de operación promedio del puente grúa</i>	25
Tabla 16 <i>Matriz de decisión</i>	28
Tabla 17 <i>Costos de materiales y softwares</i>	29
Tabla 18 <i>Costos de horas extras</i>	29
Tabla 19 <i>Costos de capacitación</i>	29
Tabla 20 <i>Inversión inicial</i>	30
Tabla 21 <i>Datos de los parámetros del modelo – Productos</i>	32
Tabla 22 <i>Datos de los parámetros del modelo – Ubicaciones</i>	33
Tabla 23 <i>Plan de implementación prototipo</i>	34
Tabla 24 <i>Ubicaciones asignadas por el modelo a cada producto</i>	36

Tabla 25 <i>Resultados del Modelo</i>	38
---	----

Capítulo 1

1. Introducción

La empresa donde se lleva a cabo el siguiente proyecto se especializa en la producción, distribución y comercialización de una extensa variedad de productos de acero, incluyendo tuberías, planchas, techos, perfiles y más. Actualmente, opera con 26 líneas distribuidas en tres plantas industriales de Guayaquil.

La tercera planta de producción, donde se centra la gestión de las operaciones logísticas, cuenta con 5 galpones donde se procesan, almacenan y despachan diferentes tipos de materiales de diversas dimensiones y calidades de acero.

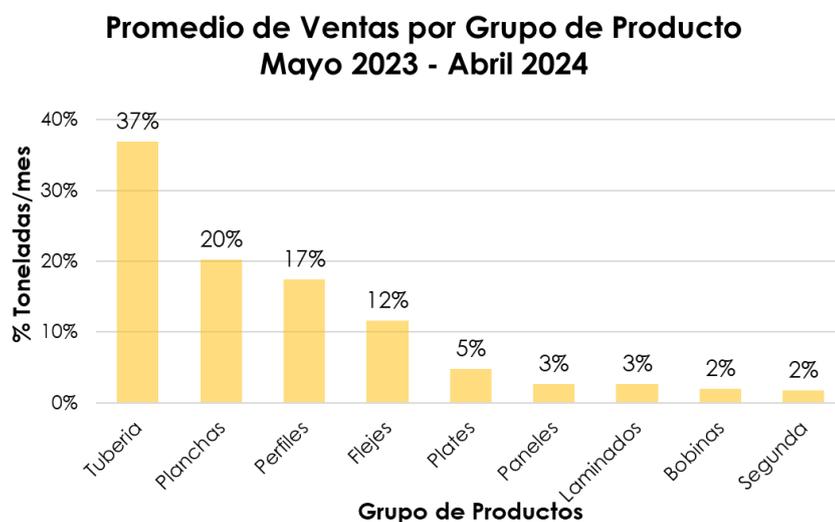
Con el objetivo de incrementar la eficiencia de la cadena de abastecimiento, se diseñará un sistema de almacenamiento de materiales con ubicaciones fijas que permitan reducir las distancias recorridas durante el picking, con una política de inventarios según la frecuencia, volumen y cantidad de ventas, para aumentar las toneladas despachas desde un galpón.

1.1 Descripción del Problema

En un periodo de análisis de 12 meses, desde mayo del 2023 hasta abril de 2024, las tuberías han representado el 37% de las ventas totales, tal como se observa en la figura 1, siendo este grupo de productos los de mayor rotación, lo que lo convierte nuestro objeto de estudio.

Figura 1

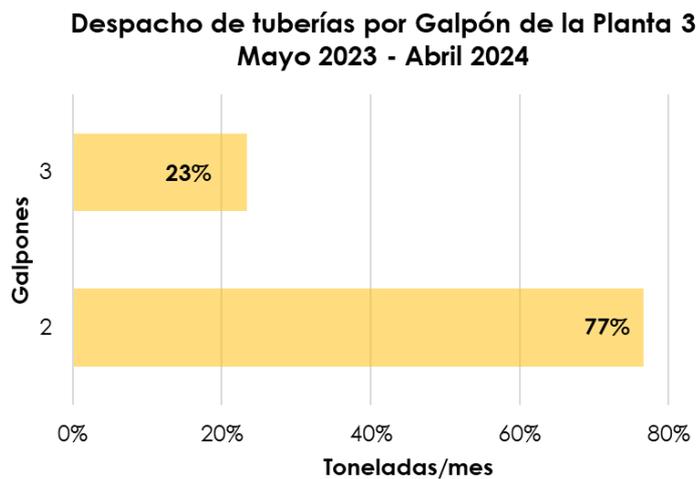
Promedio de ventas mensuales por grupo de producto



Por esta razón, se analizaron los despachos de tuberías, que se realizan en la tercera planta, teniendo que el 77% se despachan desde el galpón 2 y un menor porcentaje desde el galpón 3, donde también se almacenan tubos y otros materiales (Figura 2).

Figura 2

Despacho de tuberías por galpón de planta 3



El promedio diario de despachos en el galpón 2 es entre 80 a 120 toneladas, sin embargo, no se tiene un sistema de ubicación fija para los materiales. La disposición aleatoria de los productos terminados dentro del área de almacenamiento dificulta el proceso de picking, debido a la discontinuación e introducción de nuevos productos y las variaciones de la demanda. Esta situación genera retrasos, lo que afecta la eficiencia de la cadena de abastecimiento y la satisfacción de los clientes.

1.2 Justificación del Problema

El galpón 2, al no contar con un sistema de almacenamiento fijo para la ubicación de los materiales causa que durante el picking de los productos el nivel búsqueda sea deficiente, ocasionando que la productividad y el nivel de servicio disminuyan.

El establecer ubicaciones específicas para cada tipo de producto generaría grandes beneficios para la empresa, para comenzar, existiría mayor facilidad de localización, permitiendo que los ayudantes de despachos tengan conocimiento exactamente donde se

encontrará cada material, reduciendo así la distancia recorrida para su búsqueda y mejorando la eficiencia operativa del proceso.

En esa misma línea, la reducción del desorden mantendría el galpón en mejores condiciones, aumentando la capacidad de almacenamiento y utilización del espacio, principalmente para los productos de alta rotación que necesitan ubicaciones de fácil acceso para su respectivo despacho.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de asignación de ubicaciones para el almacenamiento de materiales en un galpón de una planta procesadora de acero, que minimice la distancia recorrida en el picking con la finalidad de incrementar la eficiencia de la cadena de abastecimiento y la satisfacción del cliente, en un periodo de 4 meses.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar una clasificación ABC para los productos almacenados en el galpón 2, basados en el volumen y la frecuencia de ventas, mejorando la gestión de inventario y la eficiencia de despacho.
- Elaborar un mapa de calor de la situación actual de almacenamiento de los materiales en el galpón.
- Diseñar un modelo de asignación de ubicaciones para el almacenamiento de los materiales cumpliendo con los requerimientos técnicos.
- Simular los resultados del diseño propuesto para el almacenamiento fijo de los productos.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 *Definir, Medir, Analizar, Diseñar, Verificar (DMADV)*

Es una metodología utilizada para desarrollar nuevos procesos o productos, considerando los requisitos del cliente en cada una de las etapas del proceso (Selvi & Majumdar, 2014). Consiste en 5 fases:

- **Definir:** Identificar los requerimiento y necesidades del cliente por orden de prioridad. Se establecen métricas en base a la información proporcionada por el cliente.
- **Medir:** En esta parte se definen variables para la recolección de datos y sus especificaciones, para ser utilizadas en el resto del proceso.
- **Analizar:** Validar la fiabilidad de los datos obtenidos en la etapa de medición. Se identifican áreas de mejora en el proceso actual y evalúan opciones de diseño.
- **Diseñar:** Desarrollo del diseño y realización de pruebas para comparar los resultados con los requerimientos del cliente.
- **Verificar:** En esta etapa se evalúan métricas para dar seguimiento a los resultados del diseño y recibir retroalimentación del cliente.

1.4.2 *Voice of Customer (VOC)*

La voz del cliente es una técnica de análisis crítico que permite obtener información precisa sobre los requerimientos que desea el cliente, con el objetivo de proporcionarle un producto o servicio que se ajuste a sus necesidades. Este análisis se lo puede elaborar a través de preguntas directas e indirectas que dan la oportunidad de comprender con éxito cuáles son sus deseos, percepciones y preferencias (Gutiérrez Pulido, 2020). Al implementar esta herramienta de interacción con el cliente, se definirán factores claves de satisfacción que posibilitarán recibir información que se alinee a sus expectativas, dando así un seguimiento oportuno y de valor que maximice la experiencia.

1.4.3 *Quality Function Deployment (QFD)*

El Despliegue de la Función de Calidad, también conocida como “la casa de calidad”, es una metodología de la mejora continua, esta herramienta tiene como objetivo traducir las necesidades y requerimientos de los clientes en características y requisitos técnicos específicos que se implementan en el diseño de un producto o servicio (James P. Womack, 1996).

El QFD es un conjunto de procedimientos, métodos y técnicas de muestreo específicas que son capaces de identificar y comunicar los recursos de producción. Para llevarse a cabo se crea y llena una serie de una o más matrices que relacionan las necesidades y requisitos técnicos que el cliente estableció para el producto o servicio. Para esto se desarrollan métricas que miden si las características del producto están satisfaciendo las necesidades del cliente, además de que permiten identificar y priorizar las especificaciones de diseño del producto.

1.4.4 *Clasificación ABC*

El análisis de Pareto o también conocido como clasificación ABC, es un método utilizado para identificar los productos según su importancia. La regla del 80/20 sugiere que el 20 por ciento de los productos o SKUs es responsable del 80% de los ingresos de una compañía (Rushton, Croucher, & Baker, 2017). Es importante identificar los ítems que son más representativos para priorizar el análisis de aspectos técnicos y gestionar eficientemente el inventario.

1.4.5 *Gemba*

Gemba, es un término japonés que significa lugar real, esta técnica de Lean Manufacturing se basa en visitas periódicas donde se identifican los obstáculos que existen durante un proceso. Da la oportunidad de comunicarse con los diferentes actores involucrados, para escuchar sus puntos de vista y así reconocer posibles sugerencias de mejora. Es una herramienta efectiva ya que conduce a un plan visual (Branislav Mičičeta, 2021).

Capítulo 2

2. Metodología

Para el desarrollo de este proyecto se implementó la metodología DMADV, la cual se divide en 5 fases: Definir, Medir, Analizar, Diseñar y Verificar. A lo largo de este capítulo se explica cada una de las etapas y las herramientas utilizadas. La parte de verificación se la desarrolla en el capítulo 3.

2.1 Definición

En esta etapa se recolectó información sobre las necesidades y requerimientos de los actores involucrados en la problemática y se establecieron las especificaciones de diseño, así como sus limitaciones.

2.1.1 VOC

Para identificar cuáles son las necesidades que surgen durante el proceso de almacenamiento y despacho el galpón 2, se requirió recolectar información de los actores involucrados, por ende, se hizo uso de la herramienta VOC, también conocida como “voz del cliente”, la cual se detalla en la figura 3. Los datos se obtuvieron mediante entrevistas para identificar los requerimientos que desean satisfacer, con la finalidad de tomar decisiones estratégicas más acertadas.

Los actores directos para el desarrollo del proyecto son: el jefe de almacenamiento y despacho, el supervisor de despacho y, por último, el controlador de despacho. Toda la información recolectada tiene como objetivo comprender cual es la perspectiva del cliente, por ejemplo, una necesidad en común de los actores es que la disposición de los materiales dentro de galpón dificulta el picking en los despachos.

Figura 3

Voz del cliente

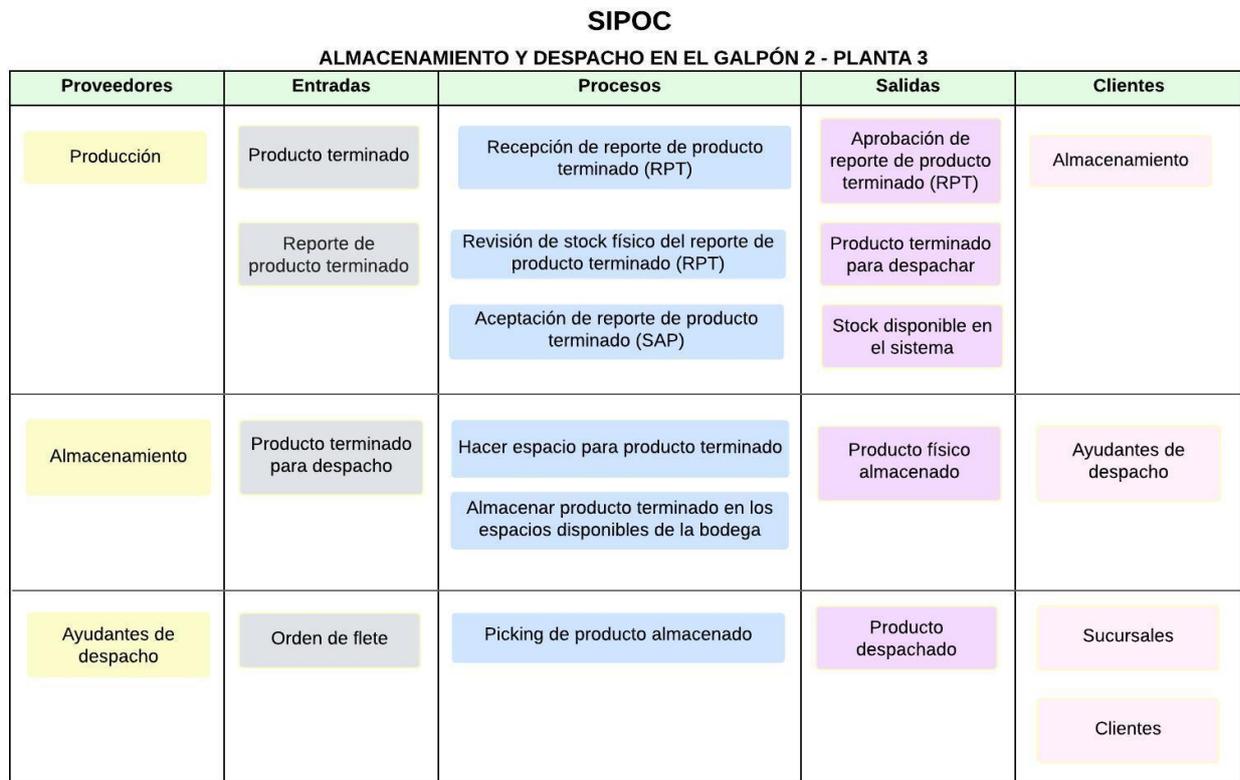
Jefe de almacenamiento y despacho		Supervisor de despacho	Controlador de despacho
Poder implementar un mejor diseño del layout	El criterio de almacenamiento que se usa no es correcto, pero lo hacen en función del espacio disponible	Existen productos que se fabrican por un pedido en específico	El material que se encuentra en el galpón es bastante comercial
Incrementar la cantidad de camiones que se despachan en un jornada	Hay que establecer los espacios necesarios para cada medida según las dimensiones	Los ayudantes recorren los pasillos buscando un material para despachar.	Con un solo puente grúa no se avanza a despachar mucho
Estandarizar que los materiales tengan ubicaciones fijas	Se tiene un espacio libre y ahí se almacenan	Algunos materiales ya no se procesan	El brazo grúa es estático, solo se mueve de un lado
Cumplir mi programación de despacho me toma más de una jornada	Solo se deben almacenar productos clasificados como tipo "A" y "B"	En el sistema se crean nuevos códigos de materiales	Existen bastantes medidas de tuberías
Se debe de cumplir el límite máximo de almacenamiento en altura	Necesitamos identificar los productos con mayor volumen y frecuencia de ventas	Hay retrasos en los despachos	El brazo grúa no abastece todo el recorrido del galpón
Tenemos una inversión que hicimos con el brazo grúa, la utilización del equipo no es del 100% por el alcance	Las ubicaciones actuales son aleatorias	Una sola persona manipula el puente y brazo grúa	El material que tiene más movimiento se encuentra adelante
	El almacenamiento debe ser volumétrico	Mejorar el sistema de almacenamiento	A veces por la disposición y movimiento de los materiales se dificulta la búsqueda
		Despacho de medidas comerciales	

2.1.2 Alcance del proyecto

El proyecto se desarrolló en la planta 3, específicamente en el galpón 2 de una empresa procesadora de acero. Se utilizó la herramienta SIPOC (Figura 4) para mapear y entender con claridad el proceso de almacenamiento y despacho en el galpón, flujo de materiales, información e incluso la comunicación entre los actores involucrados en el proceso.

Figura 4

Diagrama SIPOC

**2.1.3 QFD**

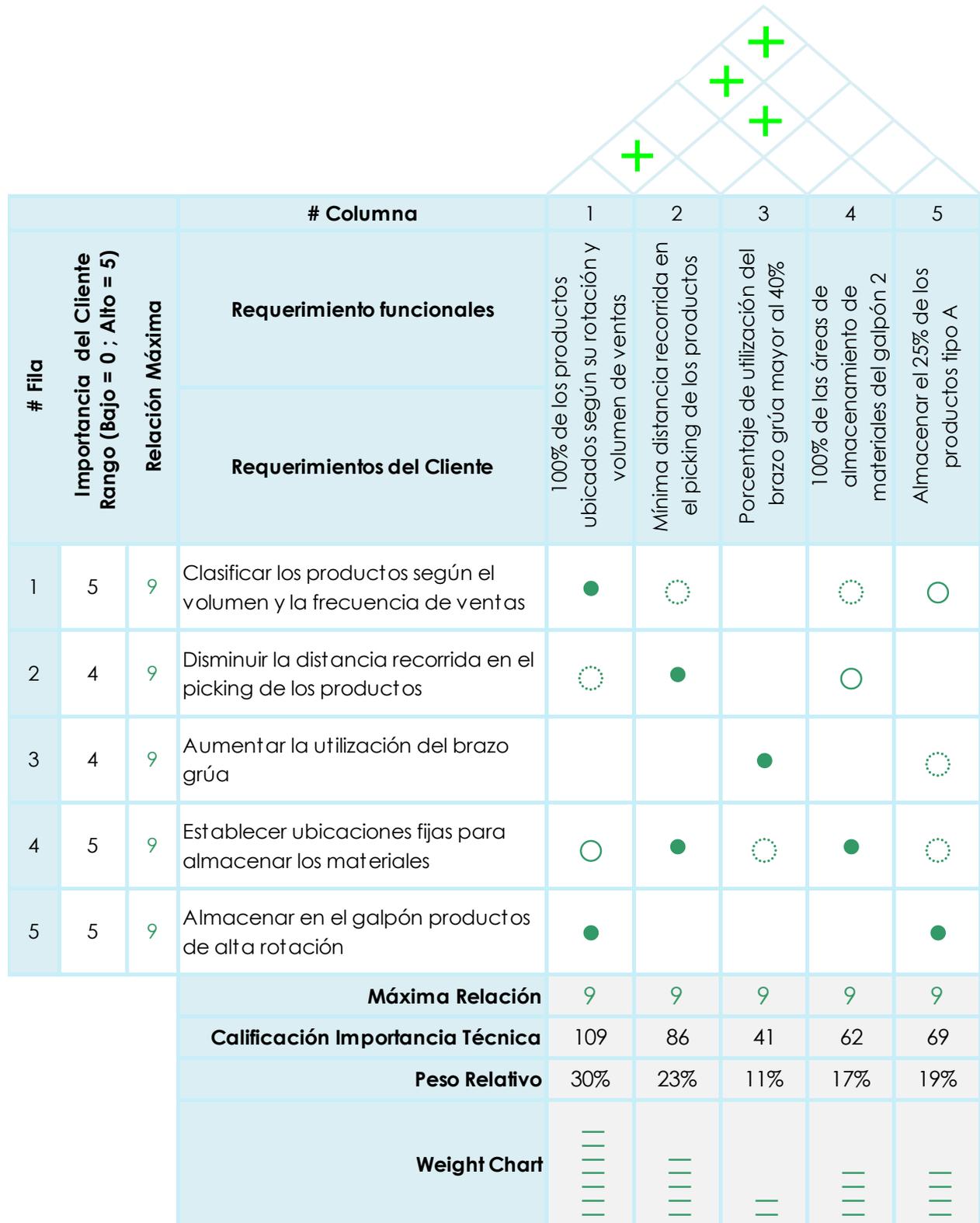
Con ayuda de esta herramienta se logró traducir las necesidades y requerimientos de los clientes en características y requisitos técnicos específicos con respecto al almacenamiento y despacho de tuberías en el galpón 2 (Figura 5).

De acuerdo con la información obtenida de los actores mediante el VOC, se definieron las siguientes necesidades:

- Clasificar los productos según el volumen y la frecuencia de ventas
- Disminuir la distancia recorrida en el picking de los productos
- Aumentar la utilización del brazo grúa
- Establecer ubicaciones fijas para almacenar los materiales

Figura 5

QFD



2.1.4 Especificaciones de diseño técnico

Las especificaciones de diseño se derivan de las necesidades y expectativas del cliente obtenidas del QFD, esta información será de vital importancia para alinear el desarrollo del sistema de almacenamiento de los materiales. Es importante recalcar que se establecen con la finalidad de cumplir de manera eficiente los requisitos del cliente.

- 100% de los productos localizados acorde a su rotación y volumen de ventas
- Mínima distancia recorrida en el picking de los productos
- Almacenar el 90% de productos tipo A
- 100% de las áreas de almacenamiento del galpón 2 señalizadas

2.1.5 Restricciones de diseño

Para establecer las restricciones de diseño se consideraron cuáles eran los factores que limitaban o condicionaban el proceso de almacenamiento y despacho dentro del galpón.

- **Puente grúa.** Un solo puente grúa destinado para el almacenamiento y despacho de los productos, con una capacidad de 10 toneladas.
- **Brazo grúa.** Tiene un brazo de 5 toneladas y su recorrido se puede realizar verticalmente hasta la mitad del galpón.
- **Espacio disponible para almacenamiento.** El área del galpón se comparte para la producción y almacenamiento de los materiales, además, de un generador eléctrico.
- **Anden de descarga.** Un solo anden para el despacho de los materiales.
- **Material no considerado en el análisis.** Se considera productos planificables que son actualmente almacenados en el galpón, siendo materiales de medidas especiales u órdenes de compras específicas no incluidas dentro de la solución.

2.1.6 Métricas de sostenibilidad

Actualmente, la sostenibilidad ha tomado un rol importante en el ámbito laboral, siendo un punto clave dentro de las organizaciones. La estructura de las métricas de sostenibilidad permite medir el comportamiento económico, social y ambiental de una industria, para minimizar cualquier resultado no deseado durante el proceso, reduciendo así los desperdicios. Para medir estos factores, se definieron indicadores para cada uno de los ámbitos.

2.1.6.1 Pilar social. El bienestar de los trabajadores influye directamente en la productividad de la cadena de abastecimiento, al reducir la cantidad de horas extras mensuales, se evita la fatiga excesiva y posibilita llevar un mejor control de los costos operativos.

$$\text{Horas extras mensuales} = \sum (\text{Horas trabajadas} - \text{Horas estándar}) \text{ por día}$$

2.1.6.2 Pilar económico. El despliegue de un indicador sobre las toneladas despachadas al mes permite monitorear el material entregado desde el galpón 2, controlando el inventario y eficiencia operativa del proceso.

$$\text{Toneladas despachadas por mes} = \sum \text{Toneladas despachadas por día}$$

2.1.6.3 Pilar ambiental. Se buscó establecer un indicador que asegure la reducción del impacto ambiental durante el proceso de almacenamiento y despacho de los materiales dentro del galpón 2, para ello se mide el consumo de energía del puente grúa en kW por mes.

$$\text{Consumo de energía mensual del puente grúa} = \text{Potencia} \times \sum \text{Tiempo operativo por día}$$

2.2 Medición

Se establecieron los datos necesarios para el desarrollo del modelo de asignación, y se elaboró un plan para obtener la información, validar si es confiable y definir su uso en el proyecto.

2.2.1 *Recolección de datos*

En esta etapa, según las especificaciones de diseño establecidas en el QFD y los indicadores de la triple línea base, se elaboró un plan de recolección de datos (Tabla 1) que permitió obtener la información necesaria para desarrollar el modelo, además de identificar la situación actual del galpón, para analizar los resultados e implementar el diseño de la solución.

Tabla 1*Plan de recolección de datos*

	<i>¿Qué?</i>		<i>¿Dónde?</i>	<i>¿Cuándo?</i>	<i>¿Cómo?</i>	<i>¿Por qué?</i>	<i>Factores de estratificación</i>	<i>¿Quién?</i>	
<i>N°</i>	<i>Significado Operativo</i>	<i>Unidad de medida</i>	<i>Tipo de dato</i>	<i>¿Dónde recolecto?</i>	<i>¿Cuándo recolecto?</i>	<i>Método de recolección</i>	<i>¿Por qué recolectar?</i>		
<i>X1</i>	Despacho mensual de tuberías	Toneladas/mes	Continua	ERP	Datos desde junio 2023 hasta mayo 2024	Datos históricos	Determinar el promedio de toneladas despachadas desde el galpón 2 (TBL)	Tuberías almacenadas en el galpón 2	Analista de abastecimiento
<i>X2</i>	Venta mensual de tuberías	Unidades/mes, toneladas/mes	Continua	ERP	Datos desde junio 2023 hasta mayo 2024	Datos históricos	Establecer una clasificación ABC	Tuberías almacenadas en el galpón 2	Analista de abastecimiento
<i>X3</i>	Número de ítems almacenados en el galpón	Número de ítems	Discreta	ERP, Galpón 2	Etapas de medición	Reporte, conteo físico	Asignar ubicaciones en el galpón para cada ítem	Por producto	MC-MH
<i>X4</i>	Dimensión de los SKUs	Milímetros, m3	Continua	ERP	Etapas de medición	Base de datos	Restricciones del modelo de asignación	Por producto	MC
<i>X5</i>	Peso de los SKUs	Kilogramos	Continua	ERP	Etapas de medición	Base de datos	Restricciones del modelo de asignación	Por producto	MC
<i>X6</i>	Cantidad de productos almacenados	Unidades	Discreta	ERP	Etapas de medición	Reporte del sistema	Restricciones del modelo de asignación	Por producto	MC

X7	Dimensiones del galpón	Metros	Continua	Galpón 2 Planta 3	Etapa de medición	Medición directa	Restricciones del modelo de asignación	Área de almacenamiento o	MC-MH
X8	Número de ubicaciones para almacenamiento	Número de ubicaciones	Discreta	Área de despacho	Etapa de medición	Observación directa	Determinar el número de espacios disponibles para almacenamiento	Área de almacenamiento o	MC-MH
X9	Distancia recorrida en el picking	Metros	Continua	Área de despacho	Etapa de medición	Medición directa	Estimar la distancia recorrida desde el andén a cada ubicación	Por ubicación	MC-MH
X10	Horas extras trabajadas	Horas extras/mes	Discreta	Reporte	Etapa de medición	Información de la empresa	Controlar la variable del pilar social (TBL)	Turno de trabajo	MC
X11	Especificación de la potencia del puente grúa	kW	Discreta	Área de mantenimiento	Etapa de medición	Información de la empresa	Controlar la variable ambiental (TBL)	Puente grúa	MH
X12	Tiempo de operación del puente grúa	Horas	Continua	Galpón 2 Planta 3	Etapa de medición	Observación directa	Controlar la variable ambiental (TBL)	Puente grúa	MH

2.2.2 Validación de los parámetros

Para garantizar la confiabilidad de los datos se procedió a realizar pruebas estadísticas en el software Minitab, asimismo se decidió utilizar herramientas de mejora continua como Gemba walk y la comprobación visual. La validación de los datos pretende verificar que la información recolectada sea precisa, completa y confiable.

2.1.2.1 Despacho mensual de tuberías. Esta información, medida en toneladas por mes, abarca un período continuo desde junio de 2023 hasta mayo de 2024 (Tabla 2). Los datos históricos se recolectaron a través del sistema utilizado por la empresa, este análisis es fundamental ya que determina el tonelaje promedio despachado en el galpón 2.

Tabla 2

Despacho mensual de tuberías en el galpón 2

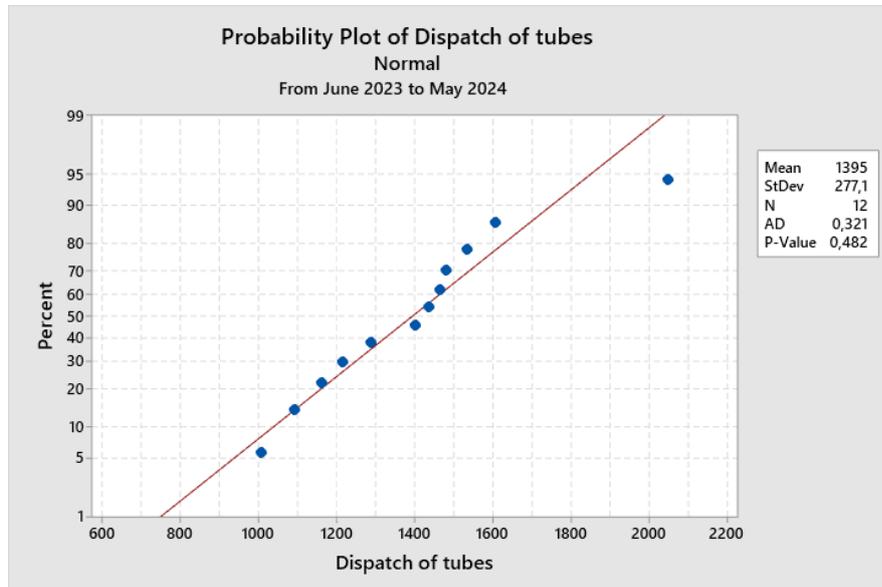
Mes	Despacho (TM)
Jun-23	1482
Jul-23	1437
Ago-23	2048
Sep-23	1465
Oct-23	1606
Nov-23	1215
Dic-23	1008
Ene-24	1400
Feb-24	1093
Mar-24	1160
Abr-24	1289
May-24	1535

Nota. Información proporcionada por la empresa

El análisis estadístico que se realizó en el software Minitab, para comprobar la normalidad de los datos, muestran una media de 1394.8 toneladas (Figura 6). La prueba de hipótesis indica que no hay suficiente evidencia estadística para afirmar que la media posee una variación significativa que afecte la confiabilidad de los datos.

Figura 6

Gráfica de probabilidad del despacho mensual de tuberías en el galpón 2

**Tabla 3**

Estadísticas descriptivas del despacho mensual de tuberías

N	Media	Desviación	Error est.	95% CI for μ
12	1394,8	277,1	80,0	(1218,8;1570,9)

Tabla 4

Prueba T para comparación de medias

Hipótesis nula	Hipótesis alternativa	T-Value	P-Value
$H_0: \mu = 1264$	$H_1: \mu \neq 1264$	1,64	0,130

2.1.2.2 Ventas mensuales de tuberías. Las ventas, medida en toneladas por mes, abarcan un período continuo desde junio de 2023 hasta mayo de 2024 (Tabla 5). La data histórica se recolectó mediante el sistema ERP de la empresa, con la finalidad de elaborar una clasificación ABC de los materiales, y así analizar el almacenamiento de los productos según la rotación, volumen y frecuencia dentro del galpón 2.

Tabla 5*Venta mensual de tuberías del galpón 2*

Meses	Venta (TM)
Jun-23	1483
Jul-23	1633
Ago-23	1912
Sep-23	1798
Oct-23	1683
Nov-23	1347
Dic-23	1046
Ene-24	1248
Feb-24	1208
Mar-24	1768
Abr-24	1298
May-24	1527

Nota. Información proporcionada por la empresa

El análisis estadístico, al igual que los despachos, se realizó en el software Minitab, para comprobar la normalidad de los datos, en este caso se muestra una media de 1495.9 toneladas (Figura 7), con una variabilidad normal. La prueba de hipótesis indica que no hay suficiente evidencia estadística para afirmar que la media posee una variación significativa que afecte la confiabilidad de los datos.

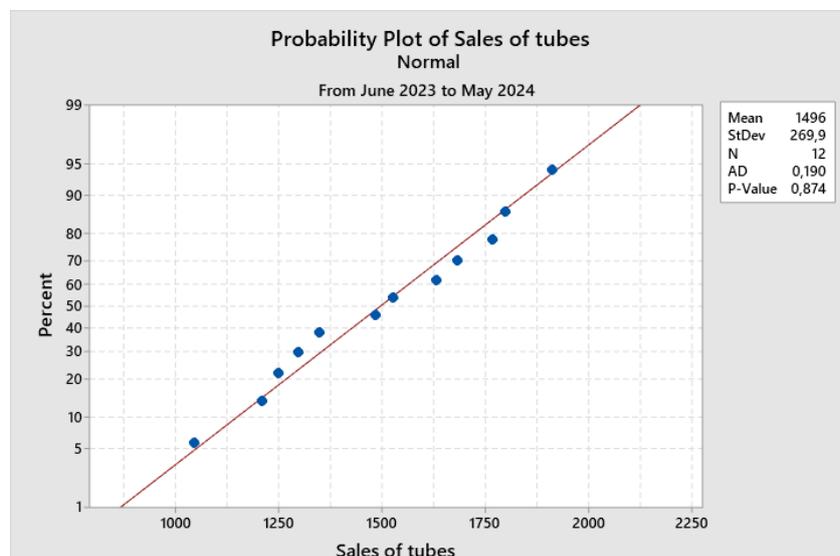
Figura 7*Gráfica de probabilidad de las ventas mensuales de tuberías en el galpón 2*

Tabla 6*Estadísticas descriptivas de la venta mensual de tuberías*

N	Media	Desviación	Error est.	95% CI for μ
12	1495,9	269,9	77,9	(1324,4;1667,4)

Tabla 7*Prueba T para comparación de medias*

Hipótesis nula	Hipótesis alternativa	T-Value	P-Value
$H_0: \mu = 1345$	$H_1: \mu \neq 1345$	1,94	0,079

2.1.2.3 Número de ítems almacenados en el galpón. Dentro del galpón existen alrededor de 107 ítems almacenados (Tabla 8), la información se recolectó a través de la base de datos histórica de la empresa. El propósito de esta medición es asignar ubicaciones fijas en el almacén según el tipo de material, es más, para la verificación de datos, se realizó un Gemba walk, donde se recorrió todo el galpón 2 de la planta 3, para una comprobación visual.

Tabla 8*Ítems almacenados en el galpón 2*

N°	Material	Calidad
T1	Tub. Cuad. 30X30X1.50X6000 mm	GB
T2	Tub. Cuad. 40X40X1.50X6000 mm	GB
T3	Tub. Cuad. 50X50X1.50X6000 mm	GB
T4	Tub. Cuad. 30X30X1.50X6000 mm	LC
...
T104	Tub. Cuad. 40X40X1.80X6000 mm	GB
T105	Tub. Rect. 20X40X1.50X6000 mm	LC
T106	Tub. Rect. 40x20x2.0x6000 mm	GB
T107	Tub. Cuad. 30X30X1.80X6000 mm	LC

Nota. Información proporcionada por la empresa

2.1.2.4 Dimensión de los SKUs. Las dimensiones de los materiales, medidas en milímetros, son proporcionados por la base de datos ERP (ver Tabla 9). Esta información es

esencial para definir las restricciones del galpón. Por otro lado, para la fiabilidad de esta variable se realizó una observación directa dentro del galpón 2.

Tabla 9

Dimensiones de los SKUs

N°	Geometría	Largo (mm)	Espesor (mm)	Volumen por paquete (m3)
T1	30X30	6000	1.5	0.536
T2	40X40	6000	1.5	0.930
T3	50X50	6000	1.5	1.018
...
T104	40X40	6000	1.8	0.944
T105	20X40	6000	1.5	0.487
T106	20X40	6000	2	0.505
T107	30X30	6000	1.8	0.546

Nota. Información proporcionada por la empresa

2.1.2.5 Peso de los SKUs. El peso unitario de cada uno de los SKUs se obtuvo por medio de la base de datos ERP de la empresa (Tabla 10). De manera similar, se llevó a cabo una observación directa para corroborar de manera efectiva la información de los materiales en sus etiquetas identificadoras.

Tabla 10

Peso de los SKUs

N°	Material	Calidad	Peso Unitario (Kg)
T1	Tub. Cuad. 30X30X1.50X6000 mm	GB	7.78
T2	Tub. Cuad. 40X40X1.50X6000 mm	GB	10.61
T3	Tub. Cuad. 50X50X1.50X6000 mm	GB	13.43
...
T104	Tub. Cuad. 40X40X1.80X6000 mm	GB	12.56
T105	Tub. Rect. 20X40X1.50X6000 mm	LC	7.78
T106	Tub. Rect. 40x20x2.0x6000 mm	GB	10.07
T107	Tub. Cuad. 30X30X1.80X6000 mm	LC	9.17

Nota. Información proporcionada por la empresa

2.1.2.6 Cantidad de productos almacenados. La información de la cantidad en unidades de cada uno de los productos almacenados se recolectó del reporte ERP de la empresa, considerando que el stock cubre la venta de 1.5 meses (ver Tabla 11). Adicional, se realizó el cálculo del volumen que representa el material en inventario, lo cual permitió determinar las restricciones de capacidad en el galpón. Utilizamos la observación directa para la verificación de fiabilidad de la información.

Tabla 11

Cantidad de productos almacenados en el galpón 2

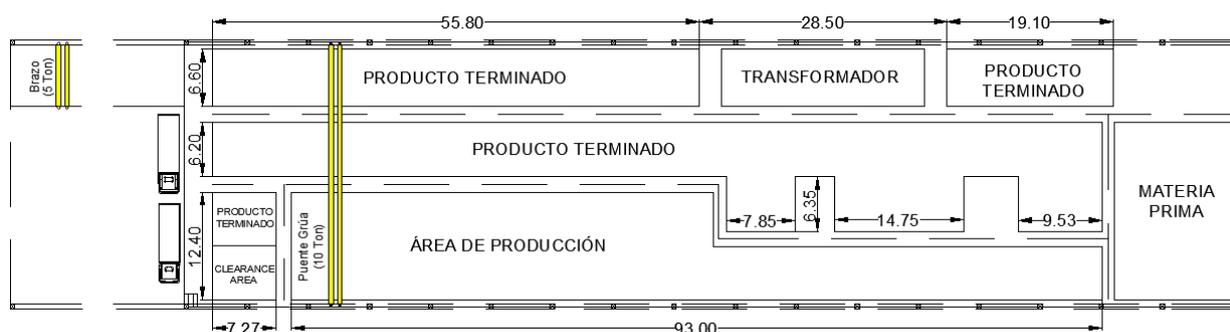
Nº	Material	Calidad	Inventario (Unidades)	Inventario (m3)
T1	Tub. Cuad. 30X30X1.50X6000 mm	GB	1696	10
T2	Tub. Cuad. 40X40X1.50X6000 mm	GB	2081	22
T3	Tub. Cuad. 50X50X1.50X6000 mm	GB	1153	19
T4	Tub. Cuad. 30X30X1.50X6000 mm	LC	2718	17
...
T104	Tub. Cuad. 40X40X1.80X6000 mm	GB	169	2
T105	Tub. Rect. 20X40X1.50X6000 mm	LC	6681	36
T106	Tub. Rect. 40x20x2.0x6000 mm	GB	1026	6
T107	Tub. Cuad. 30X30X1.80X6000 mm	LC	243	2

Nota. Información proporcionada por la empresa

2.1.2.7 Dimensiones del galpón. Para validar las dimensiones se realizó una verificación física, por lo cual, se tomaron mediciones directas en el galpón con ayuda de un flexómetro (ver Figura 8).

Figura 8

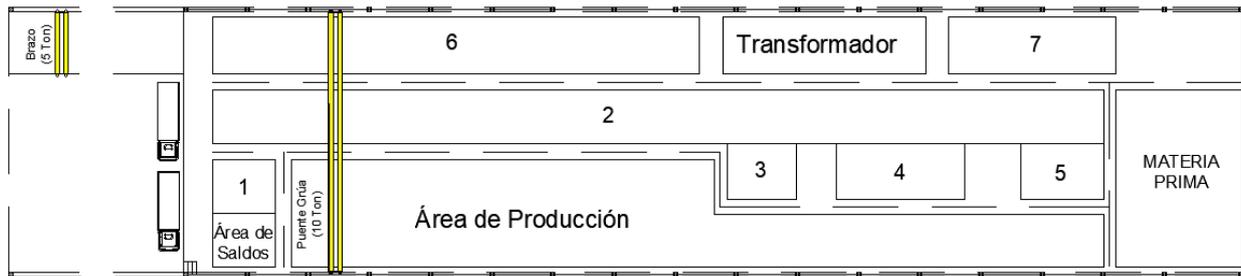
Layout del galpón



2.1.2.8 Número de ubicaciones para almacenamiento. Para la recolección de esta variable cuantitativa, se recorrió el galpón 2 de la planta 3, con la finalidad de determinar el número de espacios disponibles para el almacenamiento de los materiales (Figura 9). Se llevó a cabo la observación directa como método de verificación para la confiabilidad de los datos.

Figura 9

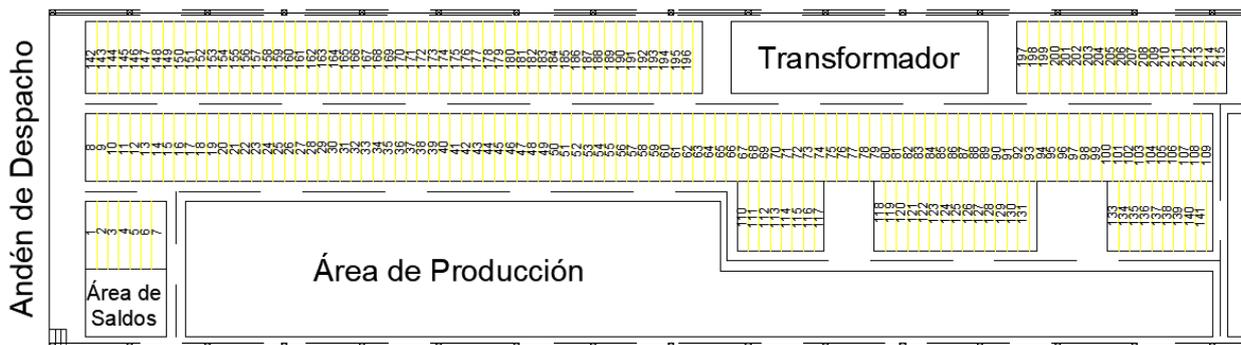
Ubicaciones disponibles para almacenamiento en el galpón 2



Una vez identificadas las áreas disponibles, al tener dimensiones muy amplias por el almacenamiento volumétrico, se dividieron en ubicaciones específicas, para el desarrollo del modelo de asignación, tal como se muestra en la figura 10.

Figura 10

Número de ubicaciones específicas para almacenamiento en el galpón



2.1.2.9 Distancia recorrida en el picking. Para la obtención de datos precisos y confiables se realizaron mediciones directamente en el galpón de la distancia lineal desde el andén de despacho hasta cada una de las ubicaciones específicas, como se observa en la tabla 12, así mismo se considera el desplazamiento adicional por la accesibilidad de ciertos pasillos.

Tabla 12*Distancia recorrida para el picking*

L	Desplazamiento lineal (m)	Desplazamiento adicional (m)	Distancia total recorrida desde el andén (m)
1	3.27		3.27
2	4.27		4.27
3	5.27		5.27
4	6.27		6.27
...
110	62.25	6.35	68.6
111	63.25	6.35	69.6
112	64.25	6.35	70.6
113	65.25	6.35	71.6
...

Nota. Información levantada en el galpón

2.1.2.10 Horas extras trabajadas. La información del sobretiempo por mes fue proporcionada por la empresa (ver Tabla 13), ya que se lleva un registro del total de horas trabajadas por el personal de almacenamiento y despacho.

Tabla 13*Promedio de horas extras trabajadas por mes*

Mes	Horas extras por trabajador (h)
Jun-23	64
Jul-23	66
Ago-23	63
Sep-23	67
Oct-23	62
Nov-23	68
Dic-23	61
Ene-24	69
Feb-24	60
Mar-24	70
Abr-24	59
May-24	71

Nota. Información proporcionada por la empresa

2.1.2.11 Especificación de la potencia del puente grúa. Esta información fue proporcionada por el área de mantenimiento (Tabla 14), es esencial debido a que permite el control del indicador ambiental. Por otro lado, para su verificación se realizó una consulta externa con el distribuidor del puente grúa, esto ayudó a corroborar los datos proporcionados por la compañía.

Tabla 14

Especificaciones del puente grúa

Capacidad	Potencia
10 ton	8.18 kW

Nota. Información proporcionada por la empresa

2.1.2.12 Tiempo de operación del puente grúa. El tiempo operativo, medido en horas, se obtuvo del galpón 2 mediante observación directa, con un promedio de 10 horas (ver Tabla 5). Esta información permitirá definir el indicador ambiental, controlando así el consumo de energía mensual del puente grúa.

Tabla 15

Tiempo de operación promedio del puente grúa

Hora inicial	Hora final	Tiempo de operación promedio (h)
7:30	18:00	10

Nota. Información recolectada en el galpón

2.3 Análisis

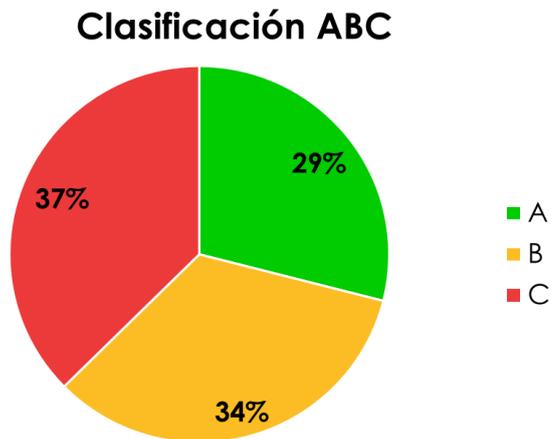
2.3.1 Situación actual

De acuerdo con la información obtenida en la recolección de datos, actualmente en el galpón se almacenan un total de 107 productos de la familia tuberías. Se elaboró una clasificación ABC basándonos en una política de inventario que considera la cantidad, el volumen y la frecuencia de ventas, para determinar los criterios de cada uno de los productos.

El 29% de las tuberías almacenadas en el galpón 2 son tipo “A”, mientras que el 34% corresponde al tipo “B” (Figura 11).

Figura 11

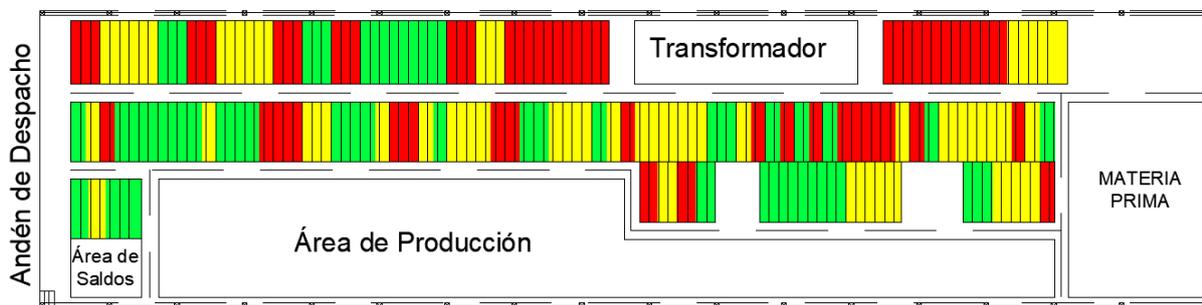
Clasificación ABC



Considerando el stock hasta el 15 de junio del 2024, se modeló la distribución actual los productos en el galpón, asignando un color según la clasificación ABC, observándose en la figura 12 que las tuberías con mayor frecuencia de despacho no se ubican en zonas cercanas al andén, lo que incrementa la distancia recorrida en el picking para esos materiales.

Figura 12

Ubicación actual de los materiales según clasificación ABC



2.3.2 *Opciones de diseño*

2.3.2.1 Storage Location Assignment Problem (SLAP). Determina las ubicaciones para el almacenamiento de materiales según una política de inventario, como la clasificación ABC, de acuerdo con la frecuencia o volumen de ventas, lo cual permite optimizar la eficiencia del picking de productos.

Los parámetros se determinan según la cantidad de espacios disponibles, los recursos para movilizar los productos, el número de materiales y sus características físicas. Por otro lado, las restricciones abarcan la capacidad de almacenamiento, de los recursos de picking y sus limitaciones de movimiento.

2.3.2.2 Slotting Optimization Model. Si el objetivo es minimizar el tiempo o distancia del picking de los materiales con mayor rotación, el Slotting Optimization Model es el más adecuado, ya que busca que los materiales se encuentren lo más cerca de la zona de despacho. Esta opción de diseño tiene en cuenta parámetros como la dimensión de los artículos, las dimensiones del almacén y, sus niveles de stock. A su vez, existen restricciones como la disponibilidad del equipo, la capacidad de almacenamiento dentro del galpón y las ubicaciones según la frecuencia de ventas.

2.3.2.3 Knapsack problem. Este modelo se utiliza cuando surge algún problema en la asignación de recursos, en este caso, cuando el número de productos es mayor a la cantidad de espacios disponibles para el almacenamiento. Tiene como finalidad maximizar el valor total de los artículos seleccionados respetando la restricción de capacidad de peso.

Para su implementación se consideran diversos parámetros como la cantidad de los materiales, sus características físicas y su peso. Por otro lado, las restricciones de este modelo abarcan la capacidad del almacén y la selección de los materiales a almacenar.

2.3.3 Matriz de decisión

Para evaluar cada una de las opciones de diseño propuestas, según las especificaciones técnicas del QFD y las restricciones previamente identificadas, se elaboró una matriz de decisión (Tabla 16), esta herramienta nos permitió identificar los modelos más adecuados.

Tabla 16

Matriz de decisión

Opciones de diseño	SLAP	Slotting Optimization Model	Knapsack Problem
Un solo Puente grúa	X	X	
Un brazo grúa	X	X	
Espacio disponible para almacenamiento	X	X	X
Solo un andén de descarga	X	X	
Material no considerado en el análisis	X	X	X
100% de los productos ubicados según su rotación y volumen de ventas	X	X	
Mínima distancia de recorrida en el picking de los productos	X	X	
100% de las áreas de almacenamiento del galpón 2 señalizadas	X	X	
Almacenar el 90% de los productos tipo "A"	X	X	

2.3.4 Análisis Financiero

Se realizó un análisis de los costos involucrados para el diseño de la solución propuesta, considerando softwares para el desarrollo del modelo de programación, materiales requeridos a fin de señalar las zonas en el galpón, así como de los productos, y el personal necesario para realizar los movimientos de materiales (Tabla 17).

Tabla 17*Costos de materiales y softwares*

Herramientas y Desarrollo	Costo
Licencia GAMS	\$ 1,400.00
Licencia Office 365	\$ 59.99
Zona señalizada	\$ 100.00
Señalización visual por ubicación de producto	\$ 100.00
Total	\$ 1,659.99

Como se observa en la tabla 18, se consideran horas extras debido a que, para colocar los productos en las zonas establecidos es necesario realizar movimientos con el puente grúa. Con la finalidad de no interrumpir las actividades diarias de despacho, se llevará a cabo los días no laborales.

Tabla 18*Costos de horas extras*

Personal	Cantidad	Horas extras (h)	Costo (\$/h)	Costo total
Asistentes de despacho	2	48	\$ 5.00	\$ 240.00
Analista de inventario	1	24	\$ 5.00	\$ 120.00
Controlador de despacho	1	24	\$ 5.00	\$ 120.00
Total	4	96		\$ 480.00

Por otro lado, en la tabla 19 se detalla el personal que es necesario capacitar acerca de cómo se llevará a cabo el almacenamiento de materiales en ubicaciones asignadas según la política de inventario.

Tabla 19*Costos de capacitación*

Personal	Horas de capacitación (h)	Costo \$/h	Costo total
Jefe de almacenamiento y despacho	6	\$ 5.00	\$ 30.00
Supervisor de bodega	6	\$ 5.00	\$ 30.00
Analista de inventario	6	\$ 5.00	\$ 30.00
Controladores de despacho	6	\$ 5.00	\$ 30.00
Asistentes de despacho	6	\$ 5.00	\$ 30.00
Total	30		\$ 150.00

Tabla 20*Inversión inicial*

Inversión inicial	Costo
Costo de materiales y softwares	\$ 1,659.99
Costos de horas extras	\$ 480.00
Costo de capacitación	\$ 150.00
Total	\$ 2,289.99

Considerando los diferentes costos, la empresa realizaría una inversión inicial de \$2289.99 aproximadamente (ver Tabla 20), representando en su gran mayoría el valor del software para resolver el modelo y mantenerlo actualizado ante cualquier variación en las ventas.

2.4 Diseñar

De acuerdo con la matriz de priorización, la opción que más se adecua a las especificaciones de diseño y las restricciones del galpón es el Storage Assignment Problem (SLAP). Por lo cual, se desarrolló un modelo de optimización considerando las características de los productos, así como de los espacios disponibles para almacenamiento.

2.4.1 Modelo**Conjuntos**

T Conjunto de productos {1,2,3, 4, ... ,107}

J Conjunto de ubicaciones {1,2, 3, ... ,215}

Parámetros

d_j Distancia desde el andén de despacho hasta la ubicación j [m]

F_t Frecuencia promedio de picking diario del producto t [picks/día]

$$F_t = \frac{\sum \text{Cantidad de veces que se realiza el picking del producto } t}{\text{número de días}}$$

Q_t Cantidad de paquetes del producto t a almacenar [paquetes]

$$Q_t = \frac{\text{Unidades en inventario del producto } t}{\text{Unidades por paquete}}$$

C_j Capacidad volumétrica de la ubicación j para almacenar material [m^3]

$$C_j = \text{alto} \times \text{largo} \times \text{ancho de la ubicación } j$$

v_t Volumen por paquete del producto t [m^3]

Variables

$$x_{tj} = \begin{cases} 1, & \text{si el producto } t \text{ es almacenado en la ubicación } j \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

y_{tj} Volumen del producto t almacenado en la ubicación j

Función objetivo. Minimiza la distancia recorrida en el picking de los productos desde el andén hasta las ubicaciones asignadas, el cual está multiplicado por la frecuencia promedio que un producto se despacha en un día, de modo que, los materiales con mayor rotación estarán en las posiciones más cercanas al andén.

$$\text{Min. } Z = \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} dj \times x_{tj} \times F_t$$

Restricciones

- Todo el volumen en stock de cada producto t es almacenado.

$$\sum_j y_{tj} = v_t \times Q_t \quad \forall t$$

- El volumen del producto t a ser almacenado no excede la capacidad de la ubicación j.

$$\sum_t y_{tj} \leq C_j \quad \forall j$$

- La siguiente restricción asegura que el producto t asignado a la ubicación j no exceda el volumen total que necesita ser almacenado en las ubicaciones disponibles.

$$y_{tj} \leq x_{tj} \times v_t \times Q_t \quad \forall t \in T, \forall j \in J$$

- Para cada ubicación j se debe asignar un único producto t .

$$\sum_t x_{tj} \leq 1 \quad \forall j$$

- Restricciones del tipo de variable

$$x_{tj} \in \{0,1\}$$

$$y_{tj} \geq 0$$

Se preparó una base de datos (Tablas 21 y 22), correspondientes a los parámetros definidos en el modelo de programación entera mixta para ingresarlos en el software donde se corrió el programa para obtener una solución óptima.

Tabla 21

Datos de los parámetros del modelo – Productos

T	N° de Paquetes	Volumen por Paquete (m3)	Frecuencia de Picking
T1	19	0.536	0.727
T2	24	0.930	1.318
T3	19	1.018	0.909
T4	31	0.536	1.636
T5	54	0.930	1.727
T6	76	1.018	2.318
T7	46	1.019	0.250
T8	3	1.503	0.150
T9	5	0.944	0.136
T10	10	1.030	0.455
T11	23	1.734	0.864
...

Nota. Información proporcionada por la empresa

Tabla 22*Datos de los parámetros del modelo – Ubicaciones*

J	Distancia desde el Andén (m)	Capacidad Volumétrica (m3)
1	3.27	24
2	4.27	24
3	5.27	24
4	6.27	24
5	7.27	24
6	8.27	24
7	9.27	30
8	3.27	24
9	4.27	24
10	5.27	24
11	6.27	24
...

Nota. Información recolectada del galpón 2

Figura 13*Formulación en GAMS*

```

SLAP.gms
888 T104 0.14
889 T105 2.15
890 T106 0.55
891 T107 0.20
892 /
893 ;
894
895 Binary variable
896 x(T,j) 1 if product t is storage in location j 0 otherwise
897 ;
898 Positive Variable
899 y(T,j) volume of product t assigned to location j
900 ;
901 Variables
902 z
903 ;
904 Equations
905 OF to minimize the picking distance
906 EQ1,EQ2,EQ3,EQ4
907 ;
908
909 OF.. z=e= sum((T,j),distance(j)*x(T,j)*Frequency(T));
910 EQ1(T).. sum(j,(y(T,j))) =e= v(T)*Inventory(T);
911 EQ2(j).. sum(T,y(T,j)) =l= c(j);
912 EQ3(T,j).. y(T,j) =l= x(T,j)*v(T)*Inventory(T);
913 EQ4(j).. sum(T,x(T,j)) =l= 1;
914
915 Model SLAP/all/;
916
917 option mip=cplex;
918
919 Solve SLAP using mip minimizing z;
920
921 Display x.l, y.l, z.l
922

```

2.4.2 Plan de implementación de prototipo

En este apartado se detalla el plan de las actividades que se llevaron a cabo para desarrollar y validar la simulación de la solución del modelo de optimización (MIP).

Tabla 23

Plan de implementación prototipo

<i>¿Qué?</i>	<i>¿Por qué?</i>	<i>¿Cómo?</i>	<i>¿Dónde?</i>	<i>¿Quién?</i>	<i>¿Cuánto?</i>	<i>¿Cuándo?</i>
Modelo de Programación Entera Mixta	<ul style="list-style-type: none"> - Minimizar la distancia de picking diaria recorrida - Definir áreas de almacenamiento en el galpón. - Asignar los productos según su rotación y volumen de ventas 	Diseñar el modelo de asignación de ubicaciones (MIP) y resolverlo en GAMS	Galpón 2, Planta 3	MC - MH	Licencia de GAMS \$1,400.00	Julio
		Simular el sistema de almacenamiento en FlexSim			Licencia de FlexSim \$532,24	Agosto
		Analizar los resultados de la simulación			-	Agosto
		Presentar la simulación			-	Agosto

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

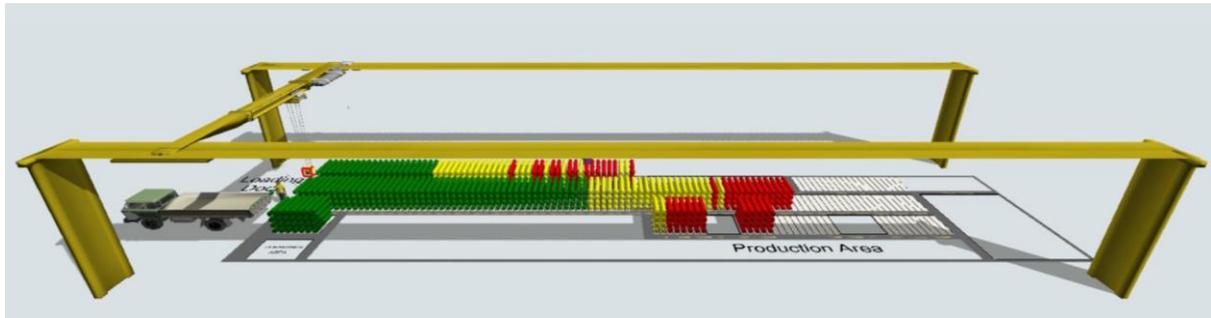
3.1 Resultados del modelo

El modelo de programación entera mixta (MIP), desarrollado en etapa de diseño, se evaluó utilizando el software GAMS, y se obtuvo una solución óptima. Los resultados de las variables detallan las ubicaciones que son asignadas para cada uno de los productos considerados dentro del análisis del galpón de estudio, esto se evidencia en la tabla 24. Así mismo, se verificó el cumplimiento de las especificaciones de diseño y restricciones.

Tabla 24

Ubicaciones asignadas por el modelo a cada producto

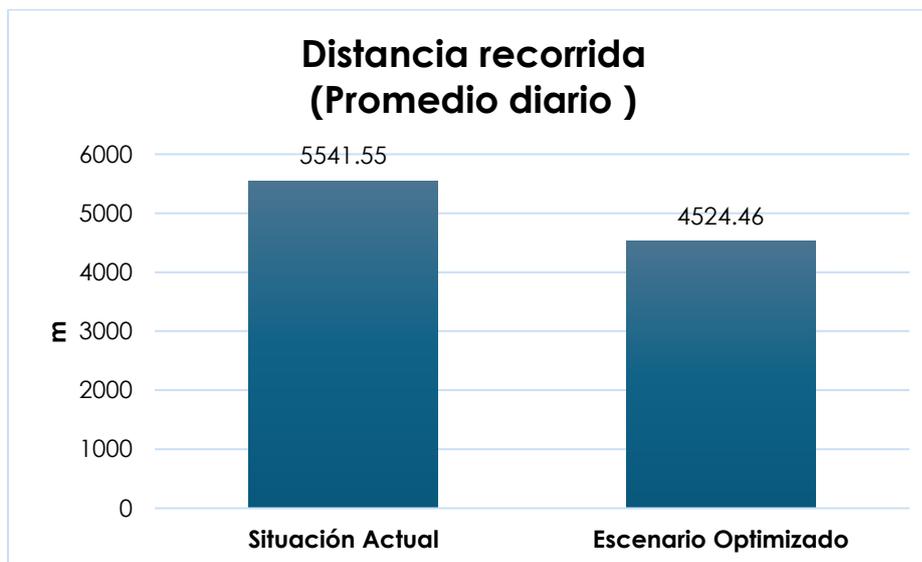
N°	Clasificación ABC	Ubicaciones
T94	A	1,2,8,9
T19	A	3, 4, 5, 10, 11
T14	A	12, 13
T17	A	14, 15, 142, 143
T6	A	16, 17, 18, 144
T105	A	19, 20
T37	A	21, 22, 145, 146, 147
T97	B	6, 7
T5	A	23, 24, 148
T38	A	25, 26, 152
T34	A	27, 149
T4	A	29
T46	A	28, 150
T63	A	30, 31,151
T64	A	32, 33, 34, 153
T16	A	36, 154
T2	A	35
T50	A	37, 38
T75	A	39,40, 155
T65	A	41
T103	A	43
T30	A	44, 156, 157
...

Figura 16*Simulación*

El resultado del modelo de optimización se comparará con el promedio de la distancia recorrida diariamente en la situación actual, que se obtuvo considerando un periodo de análisis de dos meses. Se minimizó en un 18% la distancia durante el proceso de picking, como se observa en la tabla 25.

Tabla 25*Resultados del Modelo*

	Situación Actual	Escenario Optimizado	% Minimizado
Distancia de picking diario (m)	5541.55	4524.46	18%

Figura 17*Resultados del modelo*

3.2 Resultados de las métricas de sostenibilidad

3.2.1 *Pilar social*

En la métrica social se definió las horas de sobretiempo mensual por operador, para enfocarnos únicamente en el galpón bajo análisis. En promedio, un ayudante de despacho labora 64 horas extras al mes.

Dado que se llevó a cabo una simulación, con los resultados del modelo se estimó una reducción del 15%. Para el escenario optimizado, el sobretiempo pasaría a 54 horas/mes, esto posibilita mejorar la productividad de la cadena de abastecimiento y a su vez reducir costos operativos.

3.2.3 *Pilar económico*

Mensualmente desde el galpón 2 se despacha un promedio de 1209 toneladas de tuberías. Al mejorar la eficiencia operativa e incrementar en un 10% el volumen de materiales que se puede despachar por día implicaría un aumento en las ventas, ya que permite programar un mayor número de pedidos, generando más beneficios económicos a la empresa.

3.2.4 *Pilar ambiental*

Durante el proceso de almacenamiento y despacho, para el movimiento de los materiales se hace uso en su mayoría del puente grúa. El consumo de energía mensual disminuye a 1472.4 kW/hora al reducir las distancias recorridas en el galpón.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Implementando la metodología DMADV, se desarrolló un sistema de asignación de ubicaciones que cumple con las especificaciones de diseño del modelo de acuerdo con los requerimientos técnicos del cliente para el almacenamiento de materiales en un galpón de una planta procesadora de acero. La distancia recorrida en el picking se minimizó en un 18%, siendo el promedio diario optimizado 4524.46 metros.
- El análisis de la clasificación ABC de los productos que se procesan y almacenan en el galpón evidencia que el 27% de los SKUs son de tipo “A”, mientras que el 34% están categorizados como tipo “B” y el 37% tipo “C”.
- Se elaboró un mapa de calor de la situación actual de cómo están ubicados los materiales en el galpón, según la clasificación ABC, reflejando que se lleva un tipo de almacenamiento caótico al colocar los productos en los espacios disponibles y no de acuerdo con su rotación.
- Para el diseño del modelo de optimización, basado en el SLAP, se consideró las restricciones de capacidad de las ubicaciones para el almacenamiento y las especificaciones de las tuberías, tales como sus dimensiones, lográndose almacenar en el galpón 2025 toneladas de producto terminado, que cubren 1.5 meses de inventario.
- Se asignaron ubicaciones fijas de almacenamiento para las tuberías dentro del galpón, en función de la frecuencia diaria de picking, los productos con mayor rotación están ubicados en las zonas más cercanas al andén de despacho.
- Se simuló en el software FlexSim los escenarios actual y optimizado, con los resultados del modelo de programación, identificando los SKUs con diferentes colores según su categorización ABC.

4.2 Recomendaciones

- Actualizar de forma periódica la información de la ventas y despachos para priorizar la ubicación de los productos con alta rotación diaria, ya que existen variaciones en la demanda.
- Incluir el tiempo que el operador toma en sacar un paquete de una ubicación para contemplarlo dentro del análisis del modelo.
- Realizar la implementación del modelo de optimización para evaluar con certeza el cumplimiento de las especificaciones de diseño, con la finalidad de validar si todos los productos se pueden almacenar dentro del galpón y seguir la asignación de ubicaciones obtenidas del programa.

Referencias

- Branislav Mičieta, H. H. (2021). Increasing Work Efficiency in a Manufacturing Setting. *European Research Studies Journal*, 20.
- Cohen, L. (1995). *Quality Function Deployment: How to Make QFD Work for You*. Addison-Wesley Publishing.
- Fuentes-Penna, A., Vélez-Díaz, D., Moreno-Gutiérrez, S., Martínez-Cervantes, M., & Sánchez-Muñoz, O. (2015). Problema de la mochila (Knapsack problem). *Xikua Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan*, 3(6). doi:<https://doi.org/10.29057/xikua.v3i6.1306>
- Gutiérrez Pulido, H. (2020). *Calidad y productividad*. McGraw-Hill.
- James P. Womack, D. T. (1996). *Lean Thinking, Cómo utilizar el pensamiento Lean para eliminar despilfarros y crear valor en la empresa*.
- Lopes, C., & Oliveira, A. (2024). Minimization of Costs with Picking and Storage Operations. *Systems*, 12(5), 158. doi:<https://doi.org/10.3390/systems12050158>
- Rojas Reyes, J. J., Solano-Charris, E. L., & Montoya-Torres, J. R. (2019). The storage location assignment problem: A literature review. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 199–224. doi:<https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2018.8.001>
- Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2017). *The Handbook of Logistics and Distribution Management* (Sexta ed.).
- Selvi, K., & Majumdar, R. (2014). Six Sigma- Overview of DMAIC and DMADV. *International Journal of Innovative Science and Modern Engineering (IJISME)*, 2.
- Viveros, P., Gonzalez, K., Mena, R., Kristjanpoller, F., & Robledo, J. (2021). Slotting Optimization Model for a Warehouse with Divisible First-Level Accommodation Locations. *Applied Sciences*, 11(3), 936. doi:<https://doi.org/10.3390/app11030936>