

PROYECTO DE PASANTÍA

**Implementación de un sistema de apoyo en la toma de decisiones
para la optimización del layout**

Lucas Briones Almazabar

Proyecto para optar al título de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería y
Ciencias de la Universidad Adolfo Ibáñez

Profesor guía:
Raimundo Sánchez

Santiago, Chile 2023

Resumen ejecutivo

En el dinámico mundo empresarial de hoy, el área de Logística desempeña un papel crucial, siendo responsable de la eficiente y efectiva distribución de productos a clientes. Este papel es especialmente crítico en DHL Supply Chain Chile, donde se desarrolló un innovador proyecto de ingeniería, con el objetivo de mejorar significativamente el proceso logístico para Stryker, un destacado cliente en el sector médico.

El proyecto se enfocó en la eficiencia del proceso de picking en la bodega de DHL, una métrica crítica que refleja la capacidad de la empresa para manejar y distribuir productos de manera efectiva. La eficiencia se midió a través de la implementación del modelo SLAP (Storage Location Assignment Problem), diseñado para optimizar el layout de la bodega y reducir la distancia total de picking, un desafío clave en la logística moderna.

Para garantizar un análisis exhaustivo y preciso, se recopiló una cantidad significativa de datos sobre las operaciones de picking, con un enfoque especial en las operaciones realizadas en la bodega Enea Multi-cuentas, Pudahuel. Este análisis de datos permitió identificar patrones, ineficiencias y oportunidades de mejora, proporcionando una base sólida para la implementación del proyecto.

La aplicación del modelo SLAP no solo mejoró la asignación de ubicaciones en la bodega, sino que también optimizó la gestión del inventario y la del personal. Como resultado, se logró un notable aumento en la eficiencia del proceso de picking, cumpliendo y superando los objetivos iniciales del proyecto. Además, se observó una disminución significativa en los costos operativos, reflejando una mejora sustancial en la relación costo-eficiencia para DHL y Stryker.

Este proyecto no solo demostró la viabilidad de aplicar soluciones ingenieriles avanzadas en el ámbito logístico, sino que también estableció un precedente para futuras mejoras en el sector.

Palabras claves: logística, eficiencia, optimización de picking, modelo SLAP, DHL Supply Chain, Stryker, sector médico, innovación logística.

Abstract

In today's dynamic business world, the field of Logistics plays a crucial role, being responsible for the efficient and effective distribution of products to customers. This role is especially critical at DHL Supply Chain Chile, where an innovative civil engineering project was developed with the goal of significantly improving the logistic process for Stryker, a prominent client in the medical sector.

The project focused on the efficiency of the picking process in DHL's warehouse, a critical metric that reflects the company's ability to handle and distribute products effectively. Efficiency was measured through the implementation of the SLAP model (Storage Location Assignment Problem), designed to optimize the warehouse layout and reduce the total picking distance, a key challenge in modern logistics.

To ensure thorough and accurate analysis, a significant amount of data was collected on picking operations, with a special focus on operations carried out in the Enea Multi-account warehouse, Pudahuel. This data analysis allowed for the identification of patterns, inefficiencies, and improvement opportunities, providing a solid foundation for the project's implementation.

The application of the SLAP model not only improved the allocation of locations in the warehouse but also optimized inventory management and staff efficiency. As a result, there was a notable increase in the efficiency of the picking process, meeting and exceeding the initial objectives of the project. Additionally, a significant reduction in operational costs was observed, reflecting a substantial improvement in the cost-efficiency relationship for DHL and Stryker.

This project not only demonstrated the feasibility of applying advanced engineering solutions in the logistics field but also set a precedent for future improvements in the sector.

Keywords: logistics, efficiency, picking optimization, SLAP model, DHL Supply Chain, Stryker, logistic innovation.

Índice

Introducción	5
a) Contexto de la empresa.....	5
b) Contexto del problema.....	6
c) Definición del problema.....	8
Objetivos.....	9
a) Objetivo General.....	9
b) Objetivos específicos	9
c) Medidas de desempeño	9
Estado del arte	10
Solución	14
a) Alternativas de solución	14
b) Solución escogida	14
Desarrollo de la solución.....	16
a) Metodología	16
b) Plan de implementación.....	23
c) Análisis de Riesgo.....	24
d) Evaluación económica	27
Resultados	29
a) Resultados del desarrollo de la solución	29
b) Evaluación de métricas de desempeño	31
Conclusiones	35
a) Futuros impactos	35
b) Futuras ampliaciones del sistema	35
Bibliografía.....	36

Introducción

a) Contexto de la empresa

DHL Supply Chain es una renombrada multinacional alemana, parte del grupo Deutsche Post DHL, con operaciones fundamentales en la logística y gestión de la cadena de suministro. Establecida en 1969, se ha expandido globalmente, marcando una presencia significativa en más de 60 países, incluido Chile. Es líder mundial en soluciones logísticas, ofreciendo servicios como almacenamiento, transporte, distribución, y manejo de inventario, adaptados a sectores diversos como tecnología, salud, automóviles, y retail.

En América del Sur, DHL Supply Chain tiene operaciones en países como Argentina, Brasil, Colombia, y Chile, siendo este último un mercado clave, debido a su posición estratégica y creciente demanda en servicios logísticos. En Chile, DHL Supply Chain se estableció en la década de 1990, y desde entonces ha expandido su infraestructura y servicios. Cuenta con centros de distribución y almacenes estratégicamente ubicados en áreas como Santiago y otras regiones importantes, facilitando así un eficiente manejo de la logística a lo largo del país.

DHL Supply Chain Chile ofrece servicios personalizados, desde el manejo de mercancías delicadas hasta soluciones logísticas integradas para grandes corporaciones. Con un enfoque en la innovación y sostenibilidad, la empresa utiliza tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro y reducir su huella de carbono. Esto incluye sistemas de gestión de inventario en tiempo real y soluciones de transporte ecológicas. Sus operaciones en Chile se destacan por su flexibilidad y capacidad para adaptarse a las necesidades cambiantes del mercado local, ofreciendo soluciones logísticas que abarcan desde Arica hasta Punta Arenas, utilizando una combinación de transporte terrestre, aéreo y marítimo para garantizar entregas eficientes y a tiempo.

Aunque DHL Supply Chain administra una amplia red de bodegas en Chile, la práctica se centró en su bodega multi-cliente en Enea, Pudahuel. Este sitio, atiende a clientes importantes como Toshiba, Lenovo, Motorola, IBM, SpaceX, LATAM y Stryker. Esta última, con la que se colaboró en el proyecto de pasantía, es una compañía líder en el ámbito médico, destacada por su innovación y desarrollo en tecnología médica. Stryker se especializa en dispositivos y equipos

médicos, ofreciendo una amplia gama de productos que incluyen implantes ortopédicos, equipos quirúrgicos y sistemas de comunicación hospitalaria, contribuyendo significativamente a la mejora de la atención al paciente y la eficiencia en el cuidado de la salud.

La logística de DHL para el manejo de los productos de Stryker se caracteriza por su claridad y eficiencia, como se ilustra en la **Figura 1**. El proceso inicia con la recepción de mercancías de los proveedores en la bodega, donde los productos se almacenan hasta que Stryker los solicita. Los despachos desde la bodega pueden tomar dos rutas principales: pueden ser enviados directamente a Stryker o distribuidos a clínicas. Esta sencilla pero efectiva cadena logística asegura que los productos estén disponibles y sean entregados oportunamente, según las necesidades específicas del cliente o de las clínicas.

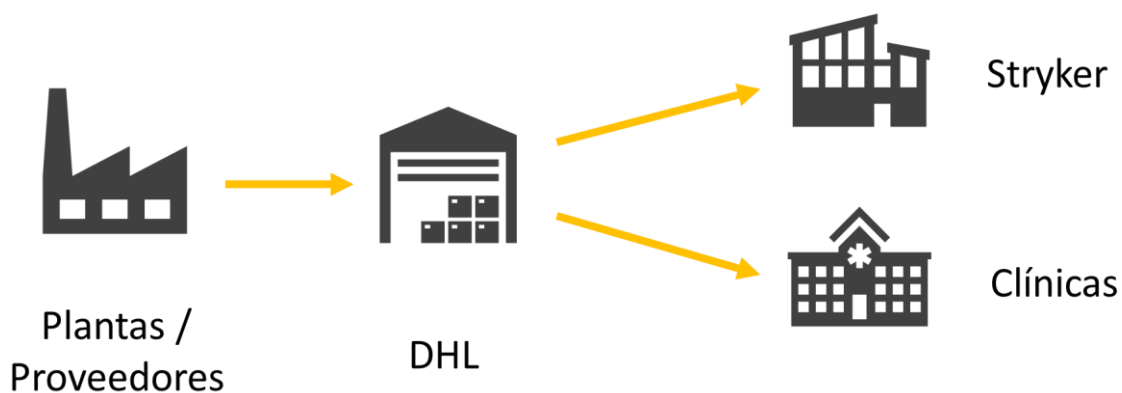


Figura 1: Red logística de DHL para el cliente Stryker. (Elaborado por DHL)

b) Contexto del problema

Al abordar la alianza entre DHL y Stryker, es crucial considerar varios factores. Primero, Stryker, al ser una empresa en el sector médico, enfrenta desafíos para predecir la demanda y anticipar pedidos debido a la multitud de variables que influyen en el ámbito médico. Segundo, la diversidad de tamaños de los productos almacenados en la bodega, que varían desde pequeños pernos para la clavícula hasta camas críticas, complica cualquier intento de automatización de procesos. Estos factores hacen que la logística y el manejo de inventario para Stryker sean especialmente complejos, requiriendo soluciones logísticas personalizadas y flexibles por parte de DHL.

Otro aspecto fundamental en la relación DHL-Stryker es la capacidad máxima de manejo de inventario para Stryker (**Figura 2**). DHL tiene una capacidad de procesamiento para ingresos o movimientos entrantes (in-bound) de hasta 1200 unidades por día. En cuanto a los despachos, la capacidad alcanza las 1250 unidades. Estos límites de capacidad son cruciales para planificar y ejecutar eficientemente las operaciones logísticas, asegurando un flujo constante y eficaz de productos tanto en la recepción como en la distribución.

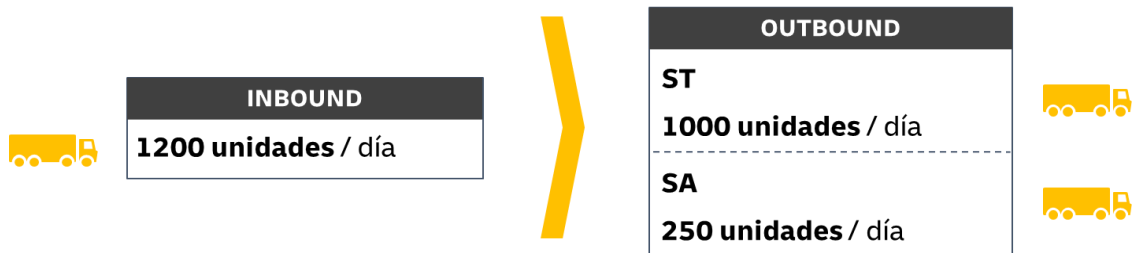


Figura 2: Capacidades de ingreso y despacho en la bodega. (Elaborado por DHL)

A pesar de que las capacidades máximas han sido previamente establecidas, resulta esencial tener en cuenta un factor crítico relacionado con el contexto actual: la notable volatilidad en el número de órdenes solicitadas a diario. Esta volatilidad es tal que, en ocasiones, se supera la capacidad máxima establecida (**Gráfico 1**).

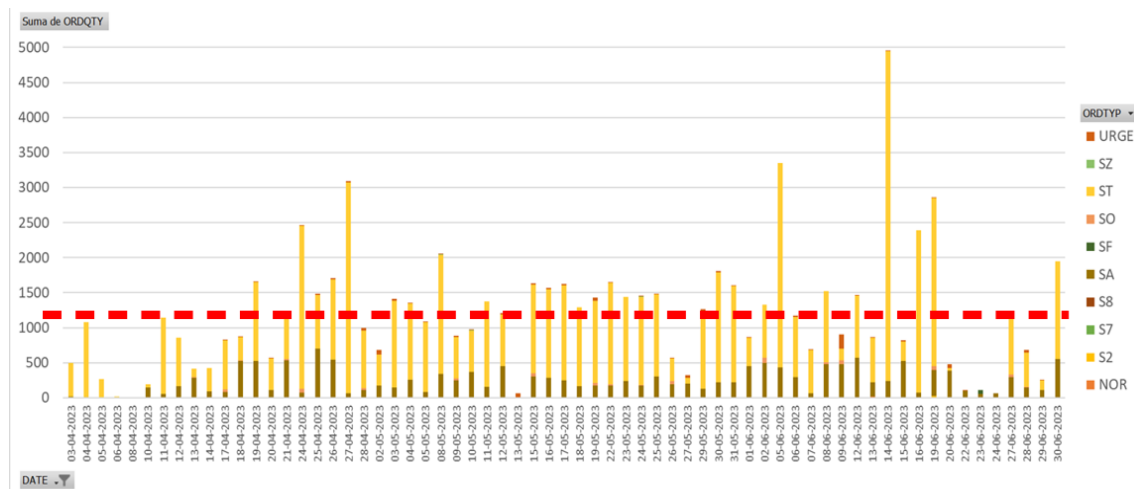


Gráfico 1: Gráfico de barras número de ordenes v/s días. (elaboración propia)

```
graph LR; A[Dificultad en el picking.] --> F[Incapacidad para cumplir la totalidad de las órdenes del día.]; B[Procesos no automatizados.] --> F; C[Tareas tediosas.] --> F; D[Posibilidad de errores.] --> F; E[Alta volatilidad en el número de órdenes.] --> F; G[Capacidad máxima superada.] --> F; H[Desorden en el layout.] --> F; I[Ubicaciones no consolidadas] --> F; J[Puntos calientes separados.] --> F;
```

El problema identificado en la compañía se caracteriza por la dificultad de completar todas las órdenes diarias. Esta situación ocasiona que los empleados no puedan finalizar sus tareas dentro del horario laboral regular, lo que conlleva a la necesidad de habilitar horas extras con un recargo adicional del 50%. Además, esta circunstancia impulsa a los empleados a trabajar más allá de su capacidad normal, lo que aumenta el riesgo de cometer errores o de omitir procesos fundamentales.

Objetivos

El propósito principal de este proyecto es optimizar el proceso de picking en la bodega para el cliente Stryker. Para esto, se han definido los siguientes objetivos:

a) Objetivo General

Desarrollar e implementar un modelo de optimización en el layout para apoyar la toma de decisiones con el objetivo de aumentar la productividad en el proceso de picking en un 5% para el mes de diciembre.

b) Objetivos específicos

- Aumentar la eficiencia en el proceso de picking.
- Reducir el número de horas extras, disminuyendo así los costos laborales asociados.
- Acortar la distancia entre el punto de entrega y las ubicaciones con mayor rotación.

c) Medidas de desempeño

Para lograr medir el desempeño del proyecto se utilizarán los siguientes indicadores:

- Productividad: Este indicador tiene como objetivo comprobar si los cambios realizados en el diseño del layout han conseguido mejorar la productividad en el proceso de picking. Se espera que este indicador se mantenga dentro del rango del 90% al 110%. Dado que este dato se recopila a través de un dashboard corporativo, no se aplica una fórmula específica para su cálculo.
- Número de horas extras: Este indicador está diseñado para efectuar una comparación detallada entre las horas extra trabajadas en el mes anterior y las del mes en curso, enfocándose en alcanzar siempre un balance positivo en esta comparativa.

$$\bigcirc \quad \frac{\text{Horas Extra}[\text{mes anterior}] - \text{Horas Extra}[\text{mes actual}]}{\text{Horas Extra}[\text{mes actual}]}$$

- Distancia de Manhattan: Este indicador está diseñado para medir la distancia de Manhattan entre los puntos de rotación más activos y el punto de despacho. Su objetivo es facilitar una comparación efectiva de esta distancia con el modelo aplicado, tanto con cómo sin la implementación del modelo de optimización. Además, se enfocará en asegurar que este valor sea consistentemente positivo.

$$\bigcirc \frac{\text{Distancia de Manhattan}[\text{Sin modelo}] - \text{Distancia de Manhattan}[\text{con modelo}]}{\text{Distancia de Manhattan}[\text{Sin modelo}]}$$

Estado del arte

El problema que hemos identificado se relaciona con la necesidad de mejorar la productividad en las tareas de picking en la bodega. Con el objetivo de lograr un incremento del 5% en la productividad, se inició un estudio profundo y detallado. Este análisis se centra en explorar y comprender las metodologías más efectivas y reconocidas en el campo de la logística, con un enfoque particular en la optimización del layout de la bodega. El objetivo es adaptar estas estrategias comprobadas a nuestro entorno específico, buscando así mejorar significativamente la productividad en las operaciones de picking.

1. Batching Picking Process (Proceso de Selección por Lotes)

Este enfoque se basa en reducir las visitas repetitivas del operario a una misma ubicación para recoger diferentes pedidos de un mismo part-number o lote. La técnica prioriza la consolidación de tareas de Picking según los part-number o códigos en lugar de hacerlo por pedido individual. Así, se posibilita la recogida de productos idénticos de distintos pedidos en un solo recorrido, con el objetivo de disminuir las visitas a cada ubicación. **(Oracle NetSuite, 2021)**

2. Metodología Slotting

El Slotting es una estrategia logística para organizar inventarios eficientemente, buscando ubicar productos de manera que se minimice el recorrido del operario durante el Picking. Los métodos estudiados fueron:

- a) Método ABC: La técnica de Slotting sigue el principio de Pareto para optimizar inventarios, categorizando productos en A, B, C según rotación y valor. 'A' incluye ítems críticos para una gestión eficiente, y 'B' y 'C' ítems menos prioritarios. Esto mejora la logística, colocando 'A'

en accesos fáciles para picking rápido y organizando 'B' y 'C' para maximizar espacio y recursos, aumentando velocidad y precisión en el almacenamiento. **(Duque, Cuellar, Cogollo,2020)**

- b) Método COI: La metodología COI, que significa "Cube-per Order Index", es una técnica de gestión de inventario que mejora la disposición espacial del almacén. Se enfoca en la relación entre el tamaño de un artículo y la frecuencia con que se pide para reorganizar el almacén, acortar los tiempos de preparación de pedidos y aumentar la eficiencia logística. Prioriza la ubicación de los artículos según su tamaño y demanda para facilitar su recolección, balancear la carga de trabajo, evitar cuellos de botella y optimizar el uso del espacio. El COI busca hacer más eficiente el proceso de Picking y la ergonomía para los trabajadores, lo que puede reducir costos y elevar la productividad.

El método COI se puede reflejar a través del siguiente modelo entero de programación lineal:

$K \rightarrow$ Ubicaciones.

$J \rightarrow$ Productos.

$I \rightarrow$ Salidas.

q = Número de ubicaciones en la bodega.

n = Número de productos en el inventario.

m = Número de puntos de entradas o salidas en la bodega. (I/O)

S_j =Número de ubicaciones requeridas por el producto J.

T_j = Número de movimientos (rotación) para el producto J.

P_i = Porcentaje de recorridos hacia los puntos de entrada o salida.

D_{ik} =Distancia requerida para ir desde el punto (I/O) hacia la ubicación.

X_{jk} =Variable de decisión, 1 si se ubica el producto j en el espacio k.

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^q \frac{T_j}{S_j} \sum_{k=1}^m P_i * D_{ik} * X_{jk}$$

S.t

$$\sum_{j=1}^n X_{jk} = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{jk} = S_j \quad (2)$$

Ecuación 1: Modelo de optimización COI (Hesket,1963)

La restricción **(1)** garantiza la exclusividad en la asignación de ubicaciones, asegurando que cada producto sea ubicado en una sola localización dentro del almacén. Esta condición es fundamental para mantener la integridad del sistema de inventario y facilitar la recuperación precisa de los productos durante el proceso de Picking.

Por otro lado, la restricción **(2)** confirma que la cantidad de espacios asignados para el almacenamiento de un producto sea equivalente al número de localizaciones que dicho producto requiere. Esto es esencial para asegurar que hay suficiente espacio asignado para acomodar el inventario disponible sin exceder la capacidad de almacenamiento de la bodega.

El problema aborda cómo equilibrar la ubicación de productos y la demanda de movimiento en una bodega para optimizar el transporte y la logística, reduciendo costos y mejorando la eficiencia.

- c) Método SLAP (Slotting Location Assignment Problem): Este método se centra en el objetivo clave de posicionar estratégicamente los productos dentro del almacén para maximizar la eficiencia operativa. La finalidad es simplificar y agilizar el proceso de Picking, minimizando el esfuerzo físico y reduciendo los tiempos de recolección, lo que se traduce en una mayor productividad y ahorro de costos. Se puede ver aplicado en el siguiente modelo

$I \rightarrow$ Productos dentro del almacén. ($i=1,2, 3,\dots, n$).

$J \rightarrow$ Ubicaciones del almacén. ($j=1,2, 3,\dots, m$).

$$X_{ij} \in (0,1) \quad (1)$$

f_{ij} : Cantidad de viajes a buscar el producto i en la ubicación j .

d_{ij} : Distancia recorrida para obtener el material i en la ubicación j .

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{ij} * d_{ij} * X_{ij} \quad (2)$$

S.t

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = 1, \forall i \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} \leq 1, \forall i \quad (4)$$

Ecuación 2: Modelo SLAP. (Munera Cardona,2020)

La variable de decisión **(1)** es una variable binaria que indica con un 1 la asignación del material i a la ubicación j , y con un 0 si no se asigna. La función objetivo **(2)** tiene como finalidad minimizar la distancia total que recorre el picker durante las operaciones de Picking. Finalmente, las restricciones **(3)** y **(4)** aseguran que cada producto sea asignado a una única ubicación y que cada ubicación contenga un solo producto, respectivamente.

- d) Método Clúster: Este enfoque se concentra en desarrollar criterios de correlación dentro del inventario con el objetivo de agrupar productos similares o aquellos con una alta probabilidad de ser solicitados simultáneamente. Al colocar estos productos juntos, se busca optimizar las operaciones de Picking, ahorrando tiempo y minimizando la distancia que el operario debe recorrer. **(Duque, Cuellar, Cogollo,2020)**

3. Metodología OPP (Order Picking Problems):

Método logístico que se concentra en mejorar las rutas de recolección de pedidos para minimizar la distancia que recorren los operarios, a diferencia del Slotting que organiza físicamente el inventario. La eficacia de OPP depende de un buen sistema SLAP (Slotting Location Assignment Problem), ya que la optimización de rutas requiere que los productos estén correctamente ubicados en el almacén. Así, OPP complementa al SLAP, siendo ambos cruciales para la eficiencia del proceso de Picking.

Solución

a) Alternativas de solución

Entre las distintas estrategias examinadas para abordar los desafíos logísticos en DHL, se han seleccionado tres opciones viables para este proyecto:

Primera Alternativa - Método ABC: Esta estrategia propone posicionar los productos de alta rotación en lugares más accesibles para facilitar el Picking. A pesar de la simplicidad y viabilidad de su implementación, un desafío significativo para DHL es la variabilidad en la demanda de los productos. La rotación de los productos cambia semanalmente, lo que dificultaría la categorización constante y precisa, haciéndola una solución subóptima bajo condiciones de alta volatilidad.

Segunda Alternativa - Estrategia de Enrutamiento OPP: La implementación de una estrategia de enrutamiento de Picking, o un problema de preparación de pedidos (OPP), es factible solo cuando se complementa con un modelo de asignación de ubicaciones SLAP. Actualmente, la asignación de productos en DHL es aleatoria y no sigue un criterio establecido, lo que limita la eficacia de OPP en ausencia de un sistema SLAP funcional que defina las ubicaciones de los productos.

Tercera Alternativa - Modelo SLAPP: La adopción de un modelo SLAP (Storage Location Assignment Problem) se presenta como una solución robusta. Este modelo busca asignar productos a ubicaciones, basándose en la rotación, lo que permitiría una asignación óptima de los espacios de almacenamiento. Con ello, se podría reducir tanto el tiempo de Picking como la distancia que los operarios deben recorrer, resultando en una mejora significativa de la eficiencia.

b) Solución escogida

Para seleccionar la solución más adecuada, se utilizó un enfoque de evaluación multicriterio. Cada solución fue valorada en función de su factibilidad, tiempo requerido para implementación, coste monetario y el impacto que tendría en las operaciones. Los criterios fueron ponderados para reflejar su importancia relativa en la toma de decisiones. (**tabla 1**)

Criterios	Ponderación	Método ABC	Método OPP	Método SLAP
Factibilidad	30%	7	7	7
Tiempo requerido	20%	7	7	7
Dinero	10%	7	7	7
Impacto	40%	3	1	7

Tabla 1: Análisis de posibles soluciones para la implementación en DHL. (Elaboración propia)

La escala de 1 a 7 permite una valoración detallada, donde 7 indica la máxima puntuación y 1 la mínima. Por ejemplo, en el criterio de impacto, que es el más ponderado, el Método SLAP obtiene la calificación más alta, lo que sugiere que es el que tiene el potencial de generar el mayor cambio positivo en las operaciones. En contraste, el Método OPP recibe la calificación más baja en este criterio, indicando que su impacto sería el menos significativo comparado con las otras opciones.

La decisión final para abordar la problemática de DHL favorece la implementación del modelo SLAP (Storage Location Assignment Problem), tras evaluar la viabilidad, costos, tiempo de implementación y, especialmente, el impacto esperado de cada alternativa. A pesar de que tanto el método ABC como OPP son factibles y no requieren de una inversión significativa, ni un plazo de implementación extenso, ambos presentan limitaciones en términos de impacto a largo plazo en la operación de la bodega.

El método ABC, aunque inicialmente útil, pierde efectividad rápidamente debido a la alta variabilidad en la demanda de productos, lo que resultaría en una asignación de ubicaciones que se volvería rápidamente obsoleta. Por otro lado, el método OPP no puede ser implementado de manera aislada, ya que depende de una estructura de ubicaciones bien definida por un modelo SLAP, el que actualmente no está en funcionamiento en la empresa.

Por lo tanto, se optó por avanzar con la implementación de un modelo SLAP adaptado a las necesidades de DHL. Este modelo no solo establecerá una asignación de ubicaciones eficiente basada en la rotación de los productos, sino que también incorporará elementos dinámicos del método ABC. La idea es revisar y ajustar periódicamente la asignación de ubicaciones para mantenerse alineado con los patrones cambiantes de demanda, garantizando así una gestión de inventario ágil y actualizada. Este enfoque híbrido promete mejorar significativamente el rendimiento de Picking y la eficiencia general de la bodega.

Desarrollo de la solución

a) Metodología

Para una correcta implementación de la solución propuesta se deben de seguir los siguientes pasos:

1. La primera etapa corresponde a la obtención de datos a través de SQL, donde se obtiene las ubicaciones en las que se retiró algún producto en un intervalo en específico (**Figura 4**).

FRSTOL	TRNDTE
S2P00-194N1B	23/11/23
S2P00-140N1A	24/11/23
S2P00-140N1A	24/11/23
S2P00-140N1B	24/11/23
S2P00-160N1B	20/11/23
S2P00-168N3B	28/11/23
S2P00-158N3B	28/11/23
S2P00-206N2B	28/11/23
S2P00-184N1B	28/11/23
S2P00-170N3A	28/11/23

Figura 4: Tabla de datos para calcular la rotación. (Elaboración propia)

Adicionalmente se deben obtener los datos sobre el inventario actual en la bodega, para poder cruzar la información de las ubicaciones con mayor rotación y corroborar si estas siguen teniendo productos (**Figura 5**).

STOLOC	UNTQTY
S2P06-128N1	2
S2P06-100N6	1
S2P07-160N6	2
S2P07-256N6	4
S2P07-256N6	1
S2P07-262N2	1
S2P07-262N2	1
S2P07-256N6	1
S2P05-100N6	1
S2P07-262N2	2

Figura 5: Inventario actual por ubicación en el sistema. (Elaboración propia)

- La segunda etapa implica el análisis de estos datos en Excel, lo que contempla la transformación de las ubicaciones a coordenadas (X, Y, Z), calcular el número de rotaciones que hay según cada ubicación y ordenarlas de mayor a menor (**Figura 6**).

STOLOC	ROTACIÓN	Ubicación original
S2P07-270N5	26	(7;58;5)
S2P07-272N5	21	(7;59;5)
S2P07-112N5	20	(7;5;5)
S2P06-274N1	19	(7;60;1)
S2P07-142N4	19	(7;16;4)
S2P05-250N3	18	(5;52;3)
S2P07-186N5	18	(7;30;5)
S2P07-238N3	17	(7;48;3)
S2P06-160N4	17	(6;21;4)
S2P07-250N2	17	(7;52;2)

Figura 6: Cálculo de la rotación según ubicación y transformación de coordenadas.
(Elaboración propia)

3. La tercera etapa corresponde al cálculo de los puntos calientes, donde se debe calcular la sumatoria del total de rotaciones y calcular el 5% de este valor, ya que este será el porcentaje que se considerará como puntos calientes. **(Figura 7) (Anexo A).**

FRSTOL	(X, Y, Z)	Rotaciones
S2P07-226N4	(7,44,4)	8
S2P07-142N3	(7,16,3)	8
S2P06-256N4	(6,53,4)	8
S2P07-138N4	(7,14,4)	8

TOTAL	599
5%	29,95

Figura 7: Definición de los puntos calientes. (Elaboración propia)

4. La cuarta etapa busca realizar un cruce entre las ubicaciones seleccionadas como puntos calientes y el inventario actual, esto se debe de realizar con el fin de corroborar si quedan productos en las ubicaciones, o éstas se encuentran vacías. En este proceso se obtiene una query desde SQL del inventario actual y se realiza un cruce en Excel entre la ubicación del punto caliente y la query de inventario **(Figura 8)**. En caso de que los puntos calientes se encuentren vacíos se vuelve al punto 3.

FRSTOL	(X, Y, Z)	Rotaciones	QTY Actual
S2P07-226N4	(7,44,4)	8	1
S2P07-142N3	(7,16,3)	8	4
S2P06-256N4	(6,53,4)	8	7
S2P07-138N4	(7,14,4)	8	4

Figura 8: Cruce Puntos calientes v/s cantidad actual en ubicación. (Elaboración propia)

5. El quinto paso corresponde a la aplicación de un modelo de optimización en Python, que busca modificar las ubicaciones correspondientes a puntos calientes, con el fin de minimizar la distancia de Manhattan entre el punto caliente y el punto donde finaliza la tarea de picking (**Ecuación 3**).

$I \rightarrow (1, 2, 3, I)$ corresponde al número de puntos calientes que existen (puntos que más se pican).

$(X, Y, Z) \rightarrow$ Corresponde a las coordenadas de una ubicación en específico de la bodega.

$DESP \rightarrow$ Punto donde finaliza la tarea del picker. (Corresponde a la coordenada (8, 4, 4))

$(X, Y, Z)_i \rightarrow$ Coordenadas del punto caliente i en la bodega.

$QTY_{x,y,z} \rightarrow$ Numero de rotaciones de la ubicación (X, Y, Z) .

$(X'', Y'', Z'')_i \rightarrow$ Nuevas coordenadas para el punto caliente i en la bodega.

$\#_{x,y,z,i} \rightarrow$ Variable binaria sobre si se asignó la ubicación (X, Y, Z) al punto caliente i .

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n (|DESP_x - X''_i| + |DESP_y - Y''_i| + |DESP_z - Z''_i|) * \#_{xyzi} * QTY_{xyz} \quad (2)$$

S.t

$$\sum_i \sum_x \sum_y \sum_z \#_{xyzi} = 1 \quad (3)$$

$$X'' \in [4, 5, 6, 7]$$

$$Y'' \in [1, \dots, 15]$$

$$Z'' \in [1, 2, 3, 4, 5, 6]$$

Ecuación 3: Modelo SLAP. (Elaboración propia)

La variable binaria **(1)** indica si el punto caliente i se asigna a la ubicación (X, Y, Z) . La función objetivo **(2)** se enfoca en minimizar la distancia de Manhattan entre los puntos de despacho y la ubicación de cada punto caliente. Finalmente, la restricción **(3)** garantiza que cada punto caliente sea asignado a una única ubicación.

El modelo de optimización **(Ecuación 3)** se debe de aplicar en Python y dará como resultado las nuevas ubicaciones para los puntos calientes que logren minimizar la distancia de manhattan entre esas ubicaciones y el punto de despacho **(Figura 9)**.

```
Coordenadas optimizadas: [(7, 16, 4), (7, 15, 4), (7, 16, 3), (7, 16, 5), (7, 17, 4),  
(7, 14, 4), (7, 15, 3), (7, 15, 5), (7, 16, 2), (7, 16, 6)]  
Distancia de Manhattan total ponderada: 1.3069710475283232  
Distancia de Manhattan total inicial: 287
```

Figura 9: Resultado de la aplicación del modelo en Python. (Elaboración propia)

6. El último paso corresponde a aplicar los resultados obtenidos en Python para la bodega, es decir realizar los cambios de ubicaciones.

Para facilitar una comprensión integral de la metodología del proyecto, se presentará un diagrama de flujo (**Diagrama 1**).

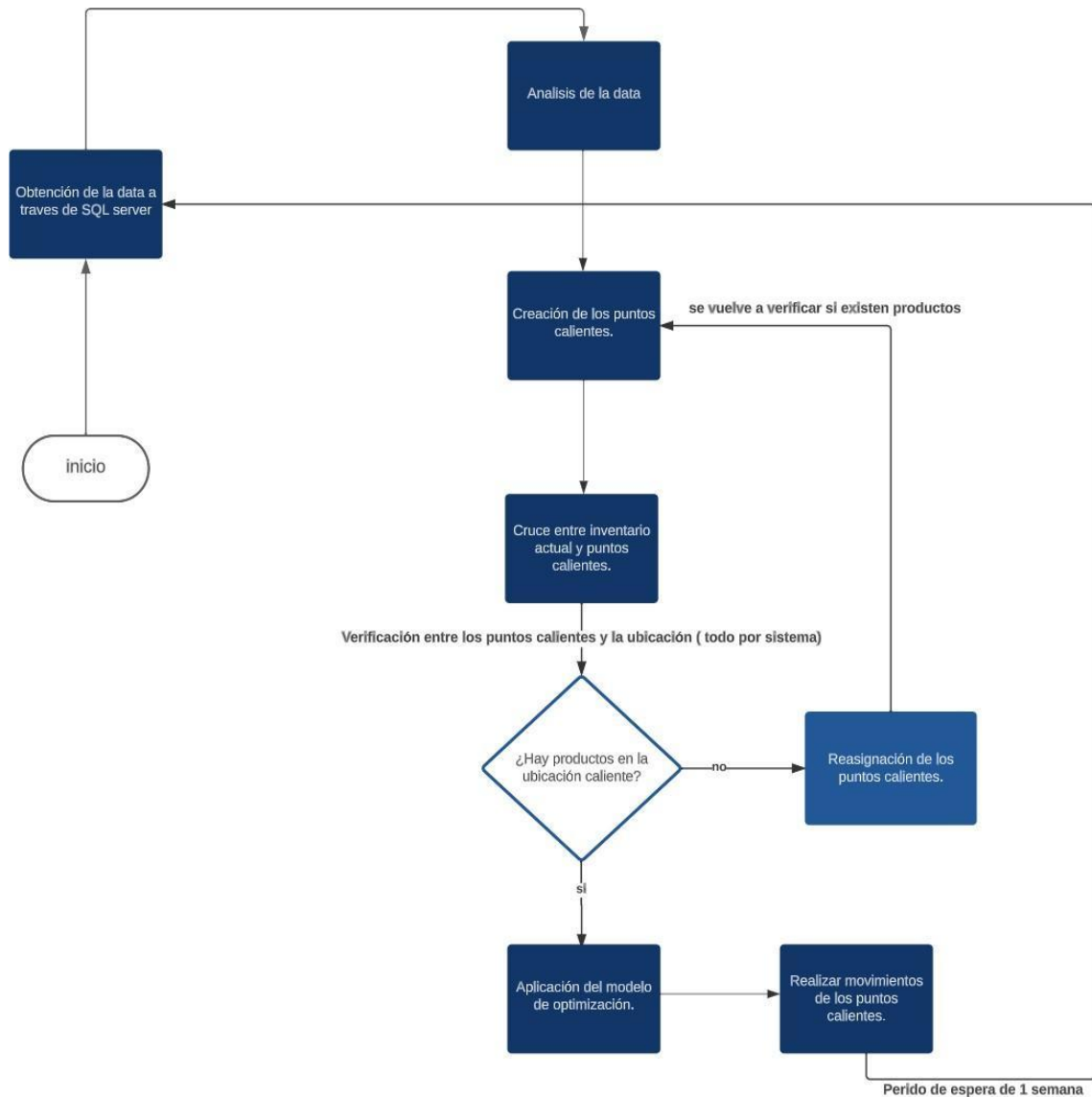


Diagrama 1: Descripción del proceso de la solución. (Elaboración propia)

b) Plan de implementación

Para asegurar una implementación exitosa de la solución propuesta, es fundamental, no limitarse únicamente a seguir los pasos detallados en la metodología. Es igualmente importante considerar cómo dicha solución se integrará dentro de la estructura de la compañía. Esta integración debe realizarse de manera cuidadosa y amigable, para evitar cualquier resistencia o rechazo por parte de los empleados. Es crucial recordar que el objetivo principal es fomentar mejoras que beneficien a todos los involucrados en la empresa.

Uno de los aspectos más relevantes en el proceso de implementación es la definición clara y precisa de los roles que cada miembro del equipo debe asumir ante las nuevas responsabilidades y tareas que surgirán como resultado de esta solución. En este contexto, un rol crítico lo desempeñarán los encargados de picking o recolección. Gracias a su experiencia y conocimiento en el manejo del Warehouse Management System (WMS) de la compañía, ellos serán fundamentales para realizar los ajustes y cambios propuestos en el modelo operativo. Por otro lado, no se puede pasar por alto la importancia de determinar quién se encargará de la recopilación y análisis de los datos relevantes, una tarea que recaerá en manos del competente equipo de ingeniería de DHL. Para garantizar una transición fluida y eficiente, se realizará una capacitación específica a este equipo, donde se explicarán detalladamente los análisis necesarios para la implementación de la solución y cómo aprovechar al máximo el modelo desarrollado en Python para lograr los objetivos.

Finalmente, y no menos importante, es crucial establecer con precisión los intervalos de tiempo entre las iteraciones del modelo y determinar el número de ubicaciones que se modificarán. Se debe considerar, de que la solución que se propone implica una novedad y un cambio significativo respecto a las operaciones actuales de la empresa. Por lo tanto, es vital tener en cuenta que podría existir una resistencia inicial, especialmente si la implementación resulta en una carga de trabajo excesiva para los empleados. Para mitigar estos riesgos, solo se alterarán las ubicaciones que representen hasta un 5% del total de rotaciones en el período evaluado. Además, se ha establecido que la aplicación del modelo se realizará semanalmente, específicamente los viernes. Este enfoque busca un equilibrio óptimo, evitando una sobre optimización del layout y de esta forma minimizar la posibilidad de rechazo por parte del personal. Con estas medidas, se aspira a una transición suave, moderada y exitosa hacia la mejora continua de las operaciones.

c) Análisis de Riesgo

En cualquier proyecto, la identificación y gestión de riesgos son cruciales para su éxito. Esta sección se enfoca en detallar los posibles riesgos asociados al proyecto, abordando desde desafíos técnicos hasta aspectos operativos y humanos, y proponiendo estrategias para mitigarlos eficientemente. Reconocer y planificar para estos riesgos es esencial para garantizar una implementación exitosa y sostenible.

Los riesgos existentes en el proyecto son:

1. Demanda irregular: La alta volatilidad en la demanda y los cambios semanales en los 'productos calientes' pueden poner en riesgo el proyecto, causando reubicaciones frecuentes en la bodega y posiblemente haciendo ineficiente el ciclo de movimiento de productos.
2. Descuadre en el inventario: Dado que se realizó un Wall to Wall hace muy poco tiempo es muy improbable que el inventario no se encuentre cuadrado.
3. Reasignación de los productos que estaban en las ubicaciones que se destinaron según el modelo: Es importante tener en cuenta que, aunque algunos productos desplazados pueden tener una rotación más baja, no se deben asignar al azar.
4. Problemas de tamaño en el cambio de ubicaciones: Existe la posibilidad que al momento de cambiar los productos a otras ubicaciones estos no tengan la capacidad volumétrica requerida.
5. Optimización excesiva: La aplicación excesiva del modelo de optimización podría llevar a una sobre optimización, con posibles consecuencias negativas como la congestión de pasillos y una clasificación inadecuada de productos.
6. Costos de implementación: La implementación de un modelo que requiere cambios frecuentes en la disposición de la bodega, implica costos asociados con relación al personal que debe realizar estos ajustes.

Ahora bien, se definirá la probabilidad e impacto que generan cada riesgo en la implementación del proyecto según las tablas y categorías a continuación. (**Tabla 2**)

		Impacto		
		1	2	3
Probabilidad	3	3	6	9
	2	2	4	6
	1	1	2	3

NIVEL		DEFINICIÓN
BAJO	1 - 3	Mantener seguimiento y analizar posibles soluciones.
MEDIO	3 - 6	Planificar las acciones a tomar en caso de que ocurra.
ALTO	6 - 9	Actuar de inmediato.

Tabla 2: Clasificación de riesgos para el proyecto. (Elaboración propia)

RIESGO	NIVEL	MITIGACIÓN
Demanda Irregular	9	Para lograr que este riesgo disminuya es que se estableció un intervalo de tiempo de una semana, ya que no es un tiempo tan pequeño como para poder generar ruido en los datos.
Imprecisión en inventario	5	Realizar conteos cíclicos.
Reasignación productos	8	Reubicar los productos que quedaron sin ubicación según la rotación que tengan más cercanos al punto de despacho.
Optimización excesiva	8	Para eliminar este riesgo es que se definió un intervalo de tiempo de una semana, evitando así una sobre optimización del layout y una congestión de los pasillos.
Costos de implementación	8	Para no incurrir en un costo tan elevado es que se seleccionara solo un 5 % de los productos con más rotación para incluirlos en el modelo. (Anexo A)

Tabla 2.1: Riesgos para el proyecto. (Elaboración propia)

d) Evaluación económica

Para realizar una evaluación económica de la solución seleccionada, es esencial considerar dos perspectivas distintas: la primera está vinculada directamente a los beneficios potenciales que la implementación de la solución puede aportar a DHL, la segunda se enfoca en los costos que implicará poner en marcha la solución propuesta.

1. Enfoque en los costos

Para realizar una evaluación económica exhaustiva de la solución propuesta, es fundamental incluir los dos elementos de gasto más significativos desde la perspectiva de costos. El primer elemento para considerar es el costo laboral asociado con el reacomodo de productos dentro del almacén. Este se calcula en términos de horas hombre, a una tarifa de 3.500 [\$ por hora]. Basándose en estimaciones para este proyecto, se anticipa que se necesitará aproximadamente

una hora de trabajo semanal, lo que traduce en un costo mensual de mano de obra de 14.000 [\$/mes].

El segundo aspecto financiero crítico es el tiempo que la persona a cargo dedicará a la implementación del modelo, incluyendo la recopilación y el análisis de datos. Esta tarea requerirá una inversión de dos horas semanales, con un costo de 7.000 [\$/hora], y será llevada a cabo por el equipo de ingeniería. Esta actividad conlleva a un gasto mensual de 56.000 [\$/mes], directamente relacionado con la administración y mantenimiento del modelo.

Al combinar ambos costos, el gasto total mensual atribuido al proyecto asciende a 70.000 [\$/mes]. Este monto constituye una variable crucial en la planificación financiera del proyecto y juega un rol importante en la determinación del retorno de inversión esperado, alineándose con los objetivos estratégicos y financieros de la iniciativa.

2. Enfoque en los beneficios

Para evaluar el impacto económico de la solución propuesta desde una perspectiva de ahorro, es esencial considerar cómo disminuirán las horas extras como resultado directo de la implementación del proyecto. Este ahorro se manifiesta no solo en la reducción de los costos laborales por horas adicionales trabajadas, sino también en los costos indirectos asociados a dichas horas.

En DHL, la política de proporcionar transporte a los empleados que realizan horas extras implica gastos adicionales en servicios de taxi. Este es un costo implícito significativo que se debe tener en cuenta. La reducción de las horas extras no solo disminuirá los pagos por tiempo adicional de trabajo, sino que también mitigará los gastos de movilización del personal, ofreciendo así un ahorro doble a la compañía.

En términos numéricos, el análisis económico de la solución seleccionada se basa en el costo actual de las horas extras y los gastos asociados al transporte de los empleados. Las horas extras en DHL se pagan con un recargo del 50%, resultando en un costo de 5.250 [\$/hora]. Durante septiembre, se registraron 100 horas extras, lo que corresponde a un gasto de 525.000 [\$/mes].

Al implementar el proyecto propuesto, se estima que se conseguirá una reducción del 10% en la cantidad de horas extras, lo que significa una disminución de 52.500 [\$/mes] en los costos directos de mano de obra por horas adicionales. Además, el gasto en transporte para el mismo mes fue de 2.000.000 [\$/mes], y una reducción del 10% en las horas extras también debería traducirse en una disminución equivalente en los costos de transporte, es decir, un ahorro de 200.000 [\$/mes].

Por lo tanto, considerando tanto la reducción en las horas extras como en los gastos de transporte, el beneficio económico total estimado del proyecto se proyecta en 252.500 [\$ por mes. Este ahorro representa una ventaja económica significativa y justifica la implementación de la solución desde una perspectiva de costos.

Resultados

En esta sección, se detallarán los logros alcanzados a través de la implementación del modelo de optimización en el layout. Se realizará una medición exhaustiva de los indicadores clave y se compararán estos resultados con las expectativas iniciales establecidas para el proyecto. Este análisis permitirá evaluar la efectividad del modelo y su impacto en la optimización de procesos.

a) Resultados del desarrollo de la solución

En lo que respecta al avance del desarrollo de la solución, se puede confirmar que hasta ahora se encuentra completamente operativa y sin errores. Este logro se ha manifestado a través de tres iteraciones exitosas, en las que se han reorganizado cerca de 30 ubicaciones durante el mes de noviembre. El objetivo principal de estas modificaciones ha sido la optimización del layout, buscando de manera específica reducir la distancia de Manhattan entre el punto de despacho y las ubicaciones con mayor frecuencia de rotación, lo cual es un paso significativo hacia la mejora de la eficiencia y efectividad operacional.

La primera implementación se realizó con éxito el 10 de noviembre de 2023, período en que se efectuaron los siguientes cambios (**Figura 10**):

Ubicación Original	Nueva Ubicación
S2P07-270-N5	S2P07-142-N4
S2P07-272-N5	S2P07-140-N4
S2P07-112-N5	S2P07-142-N3
S2P07-274-N1	S2P07-142-N5
S2P07-142-N4	S2P07-144-N4
S2P05-250-N3	S2P07-138-N4
S2P07-186-N5	S2P07-140-N3
S2P07-236-N3	S2P07-140-N5
S2P06-160-N4	S2P07-142-N2
S2P07-250-N2	S2P07-142-N6

Figura 10: Primer cambio de ubicaciones en la bodega. (Elaboración propia)

En cuanto a la segunda implementación, esta se realizó el 17-11-23 y se efectuaron los siguientes cambios:

Ubicación original	Nueva Ubicación
S2P04-190N4	S2P07-148N4
S2P06-224N5	S2P07-148N5
S2P07-258N4	S2P07-150N4
S2P06-262N1	S2P07-136N4
S2P07-224N6	S2P07-138N3
S2P07-178N4	S2P07-138N5
S2P05-250N3	S2P07-140N2

Figura 11: Segundo cambio de ubicaciones en la bodega. (Elaboración propia)

La tercera y última implementación de la modelo fue el día 24-11-23, efectuándose los siguientes cambios:

Ubicación original	Nueva Ubicación
S2P05-250N3	S2P07-148-N3
S2P04-220N6	S2P07-148-N5
S2P04-200N1	S2P07-150-N4
S2P06-270N3	S2P07-136-N4
S2P04-256N3	S2P07-138-N3
S2P06-270N4	S2P07-138-N5

Figura 12: Tercer cambio de ubicaciones en la bodega. (Elaboración propia)

b) Evaluación de métricas de desempeño

Al comienzo del proyecto, se establecieron tres indicadores clave para evaluar la funcionalidad y el impacto de la solución implementada: la productividad, el número de horas directas y la distancia de Manhattan. Esta sección tiene como objetivo evaluar estos indicadores ahora que el proyecto está en marcha, con el fin de determinar la relevancia y efectividad de la solución propuesta en el contexto empresarial.

1. Productividad

En relación con la productividad, es importante destacar que la solución se puso en marcha en la segunda semana de noviembre. En ese momento, la efectividad era del 87%, según se observa en la **Figura 13**. Sin embargo, desde la implementación de la solución, este indicador ha mostrado una tendencia al alza, alcanzando e incluso superando la meta inicial de aumentar la efectividad en el proceso de picking en un 5%. Esto se evidencia en las **Figuras 13, 14, 15, 16**. (Anexo B)



Figura 13: Productividad antes de la implementación de la solución. (Dashboard para calcular indicadores en DHL).



Figura 14: Productividad luego de la primera implementación de la solución. (Dashboard para calcular indicadores en DHL).



Figura 15: Productividad luego de la segunda implementación de la solución. (Dashboard para calcular indicadores en DHL).



Figura 16: Productividad luego de la tercera implementación de la solución. (Dashboard para calcular indicadores en DHL).

2. Distancia de Manhattan

En cuanto al segundo indicador, su función es medir la distancia de Manhattan entre los puntos calientes y el lugar donde concluye la tarea de picking. Nuestro objetivo constante es asegurar que este indicador se mantenga en valores positivos, idealmente lo más próximo posible al 100%. La metodología para el cálculo de este indicador se define de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Distancia de Manhattan}[\text{Sin modelo}] - \text{Distancia de Manhattan}[\text{con modelo}]}{\text{Distancia de Manhattan}[\text{Sin modelo}]}$$

El desempeño de este indicador en cada iteración o aplicación del modelo (**ver Tabla 3**) ha sido excepcionalmente positivo. En todas las tres iteraciones, se logró satisfactoriamente el objetivo principal de minimizar la distancia mediante la aplicación del modelo, esforzándonos por alcanzar un valor lo más próximo posible al 100%.

DISTANCIA DE MANHATTAN			
Iteración	Distancia [sin modelo]	Distancia [con modelo]	KPI
1	287	1,3069	99,54%
2	224	3,9702	98,23%
3	228	0,8537	99,63%

Tabla 3: evaluación del indicador en cada iteración.

3. Número de Horas extras

En cuanto al tercer indicador, su función es comparar el número de horas extras que se habilitaron entre dos meses, en este caso se realizó la comparación entre octubre y noviembre (**Tabla 4**).

N° DE HORAS EXTRAS		
Mes	N° de horas extras	KPI
Octubre	23:19:00	
Noviembre	21:45:00	7%

Tabla 4: Evaluación del indicador según meses.

El desempeño de este indicador también fue bastante bueno, logrando reducir el número de horas extras en un 7 % para el mes de noviembre.

Conclusiones

El proyecto implementado en DHL Supply Chain Chile para optimizar el proceso de picking en la bodega destinada a Stryker, ha demostrado ser un éxito rotundo. La aplicación del modelo SLAP (Storage Location Assignment Problem) ha resultado en mejoras significativas en la eficiencia del proceso de picking, superando los objetivos iniciales con un aumento en la eficiencia de un 5% y una reducción en los costos operativos.

Esta iniciativa ha demostrado que la innovación y la aplicación de soluciones de ingeniería avanzadas son cruciales para enfrentar los desafíos en el sector logístico. La optimización del layout de la bodega y la reorganización de las ubicaciones de almacenamiento han permitido a DHL Supply Chain no solo mejorar la eficiencia y reducir costos, sino también establecer un nuevo estándar en la gestión logística para el sector médico.

El éxito del proyecto ha tenido un impacto positivo en la relación entre DHL Supply Chain y Stryker, reforzando la confianza y la satisfacción del cliente. Además, ha sentado un precedente importante para futuras iniciativas de optimización, mostrando que la inversión en análisis de datos, tecnología y metodologías innovadoras es fundamental para mantener la competitividad y excelencia en el servicio.

a) Futuros impactos

Se espera que, con la adopción de este modelo de optimización, se mantendrá un nivel de productividad entre el 90% y el 100% en las actividades de picking. Esto no solo mejorará la eficiencia lograda hasta la fecha, sino que también proporcionará una mayor capacidad de respuesta para gestionar las órdenes diarias. Paralelamente, se espera que, con cada nueva implementación del modelo, se observe una reducción gradual en la necesidad de horas extras mes tras mes. Finalmente, se proyecta que la distancia entre los puntos claves disminuirá progresivamente, alcanzando un estado óptimo donde las ubicaciones no requieran cambios adicionales, evidenciando de esta forma, la plena eficacia y adaptación del modelo a las dinámicas operativas de DHL.

b) Futuras ampliaciones del sistema

En relación con la implementación de la solución, es crucial destacar que esta se llevó a cabo en una zona específica de la bodega, denominada Mezzanina. La elección de esta área se debió

principalmente a consideraciones de costo y eficiencia, ya que una implementación en toda la bodega habría resultado más costosa y habría requerido el uso de grúas para mover los pallets. Por tanto, la solución desarrollada en este proyecto es altamente escalable para otras cuentas y áreas de la bodega. Sin embargo, es importante tener en cuenta el volumen de las ubicaciones; en la Mezzanina, todas las ubicaciones tienen una capacidad volumétrica similar, pero esto no se aplica al resto de la bodega. Por lo tanto, cualquier expansión de la solución a otras áreas deberá considerar esta variable como una restricción clave.

Bibliografía

- Duque, Cuellar, Cogollo. (2020). Slotting y Picking: una revisión de metodologías y tendencias

(https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052020000300514&script=sci_arttext)
- Correa, Montoya. (2011). Propuesta de mejoramiento del sistema de Order Picking en el área de unidades sueltas de un centro de distribución.
- Ríos, Morillo, Olmedo, Coronado, Gatica. (2022). A faster optimal model slotting in rack positions with mono SKU pallets.
- Munera, Cardona. (2020). Optimización de la estrategia de Slotting en un centro de distribución logístico de autopartes mediante técnicas heurísticas basada en computación evolutiva.
- Silva, Coelho, Darvish, Renaud. (2020). Integrating storage Location and order picking problems in warehouse planning.

Anexo

a) Anexo A

A continuación, se detallará la razón del porque se consideró un 5%:

La productividad asociada al movimiento de productos en la bodega desde una ubicación a otra es de 30 [LPN/HORA]. Desde un inicio del proyecto se definió como tiempo destinado para aplicar los cambios realizados por el modelo 1 hora, por lo que solo se podría mover lo que se logre realizar en ese tiempo; 30 LPN.

En promedio cada LPN contiene 5 unidades, por lo que se permite como tope mover 150 unidades dentro de la bodega en 1 hora, y esto corresponde aproximadamente al 5% de las rotaciones en cada periodo.

b) Anexo B

A continuación, se detallarán los indicadores observados en el Dashboard de control de DHL Supply Chain:

- **Cubo:** Permite realizar una comparación entre los recursos disponibles y los recursos utilizados. Su fórmula matemática es:

$$\text{EFECTIVIDAD} * \text{HORAS DIRECTAS} * \text{DISPONIBILIDAD}$$

- **Efectividad:** Permite comparar que tan productivo se es en una actividad en relación con el Target de la actividad.
- **Disponibilidad:** Corresponde al número de horas que estuvieron disponibles los operarios; cabe destacar que no se refiere a que los operarios se encuentren desocupados, sino que se encuentren trabajando dentro de la bodega.
- **Horas directas:** Corresponde al número de horas en que los trabajadores estuvieron realizando actividades que generen valor al cliente.
- **Asistencia EE (Escuela de Excelencia):** Indicador interno que muestra el porcentaje de operarios que se capacitaron con alguna materia nueva.
- **Cobertura:** N° de horas que se destinaron a alguna actividad en específico, para este caso la cobertura corresponde al proceso de Picking Mezzanina.

- **Dispersión:** Mide que tan alejados se encuentran los trabajadores en relación con la efectividad.
- **Tiempo de Arranque:** Mide cuanto tiempo transcurre entre la entrada del operario a la bodega y su primera actividad medible.
- **Diálogos formales:** Indicador interno que mide cuantos diálogos de rendimiento se realizaron por parte del coordinador de operaciones a sus trabajadores.
- **Gembas:** Indicador interno que mide cuantos instructivos de trabajo se crearon y/o corrigieron.