

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE ALMACEN PRODUCTO TERMINADO
EN PLANTA MULTI-PRODUCTO**

Proyecto de Grado- Ingeniería de Producción

ESTUDIANTES: INÉS GATTO
DANIEL MENINI

TUTOR: ADRIÁN FERRARI

Montevideo Uruguay, 20 de diciembre 2019

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se lo queremos dedicar a nuestras familias y a la gente que nos apoyó en este largo y difícil proceso.

Por otro lado, agradecer a todas las personas que formaron parte de nuestra formación universitaria y especialmente de este tramo final que fue realizar el proyecto de grado. Un especial agradecimiento al tutor Adrián Ferrari, por acompañarnos y guiarnos en lo que fue esta ardua tarea.

Un especial agradecimiento a Megapharma por recibirnos en sus instalaciones y quedar a disposición para lo que necesitáramos. Adicionalmente agradecer al Ingeniero Eduardo Gatto y a la Arquitecta Alicia Corleto por ayudarnos con su excelente y amplia experiencia profesional. Por último, también queremos incluir un agradecimiento al Ingeniero Marcel Barceló por su ayuda y orientación cuando más lo necesitábamos.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo consiste en el diseño de un almacén de productos congelados para una planta multi-producto. El punto de partida será un plan de producción y una demanda anual dados, ambos segmentados por mes de trabajo. Con estos dos elementos quedarán definidos los flujos de ingreso y egreso del almacén los cuales serán fundamentales para el diseño del mismo.

El objetivo principal será el diseño del almacén para el cual se buscará un enfoque integral. Para esto, se estudiarán las componentes del diseño independientemente, pero sin perder de vista el sistema como un todo. A lo largo del proyecto, se reitera la complejidad que un diseño integral implica debido a la gran cantidad de factores involucrados.

Se buscará realizar el diseño aplicando conocimientos de logística, programación matemática, investigación operativa, física, química entre otras disciplinas, intentando que cada decisión busque la optimización de los recursos y la máxima eficiencia operativa.

El proyecto comenzó con una revisión exhaustiva de la bibliografía. Se investigó en libros, artículos, tesis de grado y posgrado, revistas científicas, normativa pertinente, se consultó a empresas locales, profesionales del área entre otros. Comprender la evolución de la logística, desde sus orígenes hasta la revolución tecnológica de la última década, fue fundamental para entender de donde se partía y donde se encuentra esta área actualmente, por esto se expondrá de forma clara su evolución y los principales hitos que llevaron a esta ciencia a donde se encuentra en la actualidad.

Luego, se exponen los datos de flujo de ingreso y egreso, y a partir de estos y con un análisis de tiempos se determinó la cantidad de elementos de manipulación necesarios para operar de forma satisfactoria. Aquí vale la pena aclarar que se comenzó a distinguir entre dos alternativas: un diseño automatizado el cual está alineado con las últimas tendencias en la logística, y un diseño de almacén manual el cual es más representativo de la actualidad en Uruguay y la región.

Hecho esto, se prosiguió hallando la profundidad óptima de almacenamiento para cada alternativa en función del análisis de rotación para todos los productos. Definida la profundidad de estantería, el siguiente paso fue determinar las dimensiones globales para distintos layouts de almacén tratando de minimizar la superficie construida.

Se trabajó en total sobre 5 layouts diferentes, para los cuales se pasó a dimensionar los requerimientos de frío y sistema anti-incendios, logrando de esta forma obtener un diseño integral que contemple estas necesidades.

Finalmente, se realizó un análisis de inversión y costos para cada uno de los escenarios, se plantean conclusiones sobre los mismos y se comenta sobre otras posibles líneas de investigación basadas en el caso de estudio.

ÍNDICE

1. Introducción y Estado del arte

1.1. Introducción	9
1.2. Estado de arte	9

2. Egreso e Ingreso de mercadería

2.1 Introducción y análisis de datos	17
2.2 Ingreso de mercadería: Flujo de ingreso	20
2.3 Ingreso de mercadería: Elección de maquinaria	25
2.4 Ingreso de mercadería: Análisis de trayectoria y tiempos	27
2.5 Flujo de egreso	29

3. Dimensionamiento del depósito

3.1 Introducción	31
3.2 Profundidad de estantería	31
3.3 Dimensionamiento de la cámara de frío	62

4. Aire acondicionado e incendios

4.1 Introducción	72
4.2 Estructura	72
4.3 Sistema de refrigeración y carga térmica	75
4.4 Sistema de incendios	81

5. Layouts

5.2 Dimensionamiento de zonas auxiliares	88
5.3 Layouts manuales	91
5.4 Layouts automáticos	100

6. Inversión y costos

6.1 Introducción	114
6.2 Inversión	114
6.3 Costos operativos	118
6.4 Conclusiones	120

7. Conclusiones

7. Conclusiones	126
-----------------	-----

8. Anexo

8.1 Análisis sobre resultados de profundidad	128
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

1 Introducción y Estado del arte

- 1.1 Sistema filoguiado
- 1.2 Visión artificial
- 1.3 Sistema optoguiado
- 1.4 Sistema guiado laser
- 1.5 Transelevador

2 Egreso e ingreso de mercadería

- 2.1 Esquema de líneas de producción
- 2.2 Días de ocupación por línea para el mes de enero representados en una gráfica
- 2.3 Análisis mejor caso para el mes de enero
- 2.4 Análisis peor caso para el mes de enero
- 2.5 Transpaleta conductor parado imagen e información
- 2.6 Transpaleta conductor sentado imagen e información
- 2.7 AGV imagen e información
- 2.8 Layout ingreso con recorrido rectangular
- 2.9 Layout ingreso con recorrido triangular

3 Dimensionado del depósito

- 3.1 Honeycombing
- 3.2 Disposición de pallets
- 3.3 Profundidad vs altura (posiciones de pallet) – Almacén manual
- 3.4 Hueco de pallet en altura
- 3.5 Modelo en solver de Excel – Depósito manual
- 3.6 Profundidad óptima según el número de corrida para los distintos meses
- 3.7 Profundidad vs altura- modelo automático (enero)
- 3.8 Comparación de resultados para fórmula para depósito apilable vs racks (automático)
- 3.9 Comparación de resultados para fórmula para depósito apilable vs racks (manual)
- 3.10 Diagrama disposición de layout (NE par)
- 3.11 Diagrama disposición de layout (NE impar)
- 3.12 Distribución modelo en V
- 3.13 Esquema layout en V
- 3.14 Esquema de layouts automáticos
- 3.15 Diagrama depósitos automáticos con túnel de picking
- 3.16 Corte frontal Layout automático

4 Aire acondicionado y sistema anti-incendios

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

- 4.1 Gráfica doble entrada Pérdidas térmicas y variación de temperatura para obtener espesor
- 4.2 Ecuación para cálculo de pérdida de calor por paredes y techo
- 4.3 Ecuación para cálculo de pérdida de calor por genero
- 4.4 Evaporador estático
- 4.5 Evaporador dinámico
- 4.6 Ejemplo de correcto flujo de aire de los evaporadores
- 4.7 Información de separación entre aletas según temperatura
- 4.8 Requerimientos normativa uruguaya
- 4.9 Almacén manual
- 4.10 Almacén con transelevador automático

5 Layouts

- 5.1 Corte en planta – Escenario manual
- 5.2 Corte transversal – Escenario manual H
- 5.3 Corte lateral – Escenario manual
- 5.4 Box de ingreso/egreso
- 5.5 Comparación layout en H vs layout en I
- 5.7 Corte en planta – Escenario manual en V
- 5.8 Corte transversal – Escenario manual en V
- 5.9 Corte frontal – Escenario manual en V
- 5.10 Corte frontal – Escenario automático 2 pasillos picking integrado
- 5.11 Vista en planta – Escenario automático 2 pasillos picking integrado
- 5.12 Corte transversal – Escenario automático 2 pasillos picking integrado
- 5.13 Posición de rociadores in-rack en posicion de pallet
- 5.14 Posición de pallet con estantería dinámica
- 5.15 Vista en planta – Escenario automático 1 pasillo
- 5.16 Corte frontal – Escenario automático 1 pasillo
- 5.17 Corte transversal – Escenario automático 1 pasillo
- 5.18 Vista de planta – Escenario automático 2 pasillos picking exterior
- 5.19 Corte frontal - Escenario automático 2 pasillos picking exterior
- 5.20 Corte transversal - Escenario automático 2 pasillos picking exterior

6 Inversión y costos operativos

- 6.1 Puerta automática
- 6.2 Tarifa UTE grandes consumidores
- 6.3 Inversión por escenarios
- 6.4 Inversión por categoría para escenarios manuales
- 6.5 Inversión por categoría para escenarios automáticos
- 6.6 Gráfico inversión por categoría por escenario
- 6.7 Gráfico costo operativo en USD por escenarios
- 6.8 Costo operativo por categoría para escenarios manuales
- 6.9 Costo operativo por categoría para escenarios automáticos
- 6.10 Gráfico costo operativo por categoría por escenario

7 Conclusiones

8 Anexo

ÍNDICE DE TABLAS

1 Introducción y Estado del arte

2 Egreso e ingreso de mercadería

- 2.1 Capacidad productiva por SKU
- 2.2 Flujo de producción por SKU
- 2.3 Plan de producción mensual
- 2.4 Días de ocupación por línea y por mes
- 2.5 Demanda SKU 1 al SKU 9
- 2.6 Demanda SKU 10 al SKU 19
- 2.7 Días de ocupación por línea para el mes de enero
- 2.8 Datos tiempos AGV
- 2.9 Datos tiempos manual
- 2.10 Resultados tiempo AGV
- 2.11 Resultados tiempos manual
- 2.12 Egreso pallets por día por SKU final

3 Dimensionado del depósito

- 3.1 Demanda para enero
- 3.2 Resultados de profundidad óptima con política de despacho diaria.
- 3.3 Resultados de profundidad óptima con política de despacho mensual
- 3.4 Resultados para distintas corridas en los meses de enero, febrero y marzo.
- 3.5 Clasificación ABC por demanda en pallets
- 3.6 Resultados primera alternativa del análisis por familia
- 3.7 Resultados para enero, febrero y marzo – Productos A (Segunda alternativa)
- 3.8 Resultados para enero, febrero y marzo – Productos B (Segunda alternativa)
- 3.9 Resultados para enero, febrero y marzo – Productos C (Segunda alternativa)
- 3.10 Profundidad óptima con política de despacho diaria para depósito automático
- 3.11 Profundidad óptima con política de despacho de 20 días para depósito automático
- 3.12 Profundidad óptima para depósito automático (enero, febrero y marzo)
- 3.13 Profundidad óptima para depósito automático (abril, mayo y junio)
- 3.14 Resultados para modelo Excel, depósito automático – Productos A
- 3.15 Resultados para política de despacho mensual, depósito manual – Formula racks
- 3.16 Resultados modelo Excel depósito manual aplicado a meses de mayor demanda – Formula Racks
- 3.17 Resultados para modelo Excel depósito manual – Formula racks
- 3.18 Resultados para depósito manual (familia A)- Formula racks
- 3.19 Resumen resultados de profundidad óptima
- 3.20 Cuadro de resultados para dimensionamiento cámara manual

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

- 3.21 Cantidad de pallets por estantería en layout en V
- 3.22 Resultados para cámara de frío automático con túneles de picking y 2 pasillos de transelevador
- 3.23 Resultados para cámara de frío automático con túneles de picking y 1 pasillo de transelevador
- 3.24 Resultados para cámara de frío automático sin túneles de picking y 2 pasillos de transelevador

4 Aire acondicionado y sistema anti-incendios

- 4.1 Propiedades de paneles sándwich según espesores
- 4.2 Porcentajes de pérdida de calor por servicio según escenario
- 4.3 Dimensiones de escenario manual
- 4.4 Datos de superficie de escenario manual
- 4.5 Parámetros para escenario manual para el cálculo de Q_p , Q_s y Q_t
- 4.6 Resultado de carga térmica para escenario manual
- 4.7 Carga térmica para escenario manual en V
- 4.8 Carga térmica para escenario automático 1 pasillo
- 4.9 Carga térmica para escenario automático 2 pasillos picking integrado
- 4.10 Carga térmica para escenario automático 2 pasillos picking exterior
- 4.11 Cantidad de evaporadores necesarios por escenario
- 4.12 Peso de elementos para calcular carga térmica
- 4.13 Carga térmica por unidad de masa
- 4.14 Resultados cargas térmicas para los distintos escenarios
- 4.15 Resumen cantidad de rociadores por layout

5 Layouts

- 5.1 Medidas para escenario manual
- 5.2 Medidas para escenario manual en V
- 5.3 Medidas para escenario automático 2 pasillos con picking integrado
- 5.4 Medidas para escenario 1 pasillo automático
- 5.5 Medidas para escenario 2 pasillos automático picking exterior

6 Inversión y costos operativos

- 6.1 Montos unitarios infraestructura y obra civil
- 6.2 Montos unitarios maquinaria
- 6.3 Costo unitario inversión refrigeración, incendio e instalación eléctrica
- 6.4 Maquinaria necesaria por escenario
- 6.5 Mano de obra necesaria por escenario
- 6.6 Resumen inversión por escenario
- 6.7 Detalle costo mano de obra
- 6.8 Detalle costo electricidad
- 6.9 Detalle cantidad de empleados por escenario
- 6.10 Resumen costos operativos por escenario

7 Conclusiones

I. Introducción y Estado del arte

1.1 Introducción

Para la realización de este proyecto se estudia el caso de una planta con producción multi-producto y multilínea con un plan anual de producción mensual estipulado con el objetivo de realizar el diseño del almacén de producto terminado.

Los productos tienen la característica de ser congelados por lo que el almacén tendrá la particularidad de ser una cámara de frío. También se decidió con el tutor el evaluar la posibilidad de que el depósito pueda llegar a ser automático utilizando e investigando sobre tecnologías correspondientes.

Se buscará realizar el diseño del almacén aplicando conocimientos de logística, programación, investigación operativa, física, química entre otras disciplinas, intentando que cada decisión busque la optimización de los recursos y la máxima eficiencia. Para esto se estudiarán los componentes del diseño independientemente para lograr la optimización local, pero sin perder de vista el sistema como un todo buscando una optimización global.

1.2 Estado del arte

Los almacenes son una parte fundamental de la cadena de suministro debido a que su costo, diseño y gestión afectan directamente el resultado de una buena práctica logística. El costo de un almacén, puede rondar entre el 20% y 30% de los costos logísticos totales [1], por lo que optimizar su diseño será clave.

A pesar de lo recién mencionado, en los últimos años las investigaciones no se han concentrado en desarrollar métodos para los diseños de almacenes sino por el contrario los esfuerzos se han enfocado en la mejora de los procesos operativos de las áreas productivas.

Sin embargo, excepcionalmente existen autores que han trabajado en la creación de metodologías, pero estos trabajos han quedado en la fase de investigación ya que nunca llegaron a aplicarse. La solución final optada por quien tiene que encargarse de estas tareas de diseño se basa en la creatividad y experiencia de los diseñadores sin tener herramientas para decidir si el diseño elegido es óptimo.

Fue de interés para la realización del proyecto el encontrar una metodología concluyente para el diseño de almacenes de modo de utilizarla como guía, pero no se encontró en la bibliografía existente una metodología integral que sea de utilidad para el nivel del proyecto deseado. Como consecuencia, al momento de diseñar el almacén nos encontramos con un enorme grado de complejidad.

Se puede definir almacén como una fábrica de pedidos, con operaciones que generan un valor determinado [2]. Es de interés que opere con el menor costo posible y evidentemente con el mayor rendimiento posible. Esto se consigue con un diseño acertado de los flujos de material y de las funciones logísticas. El flujo de materiales es todo movimiento o mantenimiento de materiales, maquinaria o mano de obra. Es interesante ver que todas estas operaciones son improductivas por lo que reducirlas significa un abaratamiento directo en los costos logísticos.

Es una tendencia a nivel mundial el apostar por externalizar estos servicios, y las empresas más importantes no son la excepción, sobre todo aquellas empresas en

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

donde la logística de almacenamiento es un factor clave de éxito. Lo que esta opción les permite, es transformar un costo fijo a un costo variable que dependerá del número de productos que manipulen. El problema del diseño del almacén no desaparece, sino que se traslada a la empresa externa dedicada al almacenamiento.

El diseño de almacenes es altamente complejo. Es necesario abordar esta difícil tarea paso a paso. Pero, sin embargo, lo que agrega aún más dificultad, es que todos estos pasos están relacionados y la iteración entre ellos es necesaria ya que tienen un altísimo grado de retroalimentación. Adicionalmente una solución óptima en un determinado paso, puede alejar de la optimalidad a la solución del problema general (integrado). Por esto se concluye que puede que no sea posible encontrar la solución óptima debido al gran número de posibilidades en cada paso[3].

El diseño de sistemas de almacenamiento implica desde la selección de los medios de almacenamiento (tipos de estanterías) y sus dimensiones y composiciones varias, junto con la elección de los medios de manutención para la manipulación de las referencias, hasta la elección del tipo de gestión a realizar (tipo de ubicación o ciclos de extracciones).

Incluso una vez seleccionado todo lo anterior, este diseño podrá tener varias dimensiones y/o configuraciones. Diferentes números de pasillos y longitudes, profundidades según las referencias a almacenar, estanterías con distintos niveles de alturas, etc. Todas las combinaciones nombradas definirán la capacidad total del sistema de almacenamiento.

Dicho todo esto, surge la siguiente pregunta: ¿Cuál será la configuración óptima para determinadas condiciones iniciales?

El diseño de sistemas de almacenamiento alcanza tres niveles diferenciados: Estratégico, táctico y operativo [4]. Las soluciones elegidas en el nivel más alto proporcionan restricciones para los niveles inferiores.

El primer nivel, llamado **nivel estratégico** según Rouwenhorst (2000) es el que define la capacidad técnica, son decisiones que generalmente tienen impacto a largo plazo y requieren grandes inversiones. En este nivel se define lo relacionado con los flujos de material. Esto impacta en la necesidad de medios y equipos que los soporten. Las unidades de almacenaje, los medios y equipos, y los sistemas de almacenaje tienen que ser adecuados a los productos con los que se trabaje. La información para tomar este tipo de decisiones surge del planteamiento inicial, específicamente de las características físicas de los artículos, las condiciones de conservación, los perfiles de inventarios, los perfiles de los pedidos, entre otros.

Idealmente las decisiones a nivel estratégico deberían ser tomadas en conjunto de forma simultánea y sin descuidar la fuerte relación que existe entre ellas.

Rouwenhorst también indica que en el **nivel táctico** se encuentran las decisiones a mediano plazo y estarán condicionadas por las ya tomadas en el primer nivel. Algunas de las decisiones son el dimensionado de zonas, diseño de layouts, determinación del número de equipos, dimensionado del personal entre otras.

Finalmente, el mismo autor indica que las decisiones a **nivel operativo** se toman en coherencia con las tomadas en los dos primeros niveles, pero a su vez son decisiones de menor interacción. Algunas decisiones de este tipo pueden ser

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

problemas de rutas, asignación de tareas a operarios, etc. Este nivel, queda por fuera del alcance de este proyecto.

Como se mencionó en la introducción, uno de los pilares más fuertes del proyecto serán las nuevas tecnologías en el área de logística que permitan la automatización de operaciones. Para esto, se ahondará en la historia de la logística en el mundo, haciendo un posterior énfasis en las épocas que incorporan avances tecnológicos.

Son varias las posibles definiciones que están vigentes en la actualidad para la logística y tienen matices según los diferentes autores; hoy en día, puede verse como una función integradora entre los siguientes eslabones: abastecer, producir, transportar, almacenar y servir un producto o servicio hasta el consumidor final del mismo [5].

La logística es una palabra cuyo origen es militar, los “Logistikas” eran los oficiales militares encargados de abastecer al ejército. Entre 2900 al 2800 AC la logística militar se basaba en el aprovisionamiento de recursos y materiales. Luego en 1950 la capacidad de producción y ventas era superior a la de distribución, por lo que comenzaron las dificultades en la entrega puntual y eficiente de recursos. En 1960, existe un punto de inflexión al surgir los primeros centros de distribución. A fines de la década del 70, comienzan a cobrar relevancia los tiempos de entrega y la gestión de materiales, así como el servicio al cliente. Como consecuencia se aumentó la productividad de las plantas distribuidoras y se racionalizaron correctamente los servicios de transporte. Finalmente, en los años 80 con la aparición de la globalización, el aumento de las operaciones a nivel internacional conlleva a la integración y el control de todas las operaciones. Como grandes eventos que acompañaron esta evolución se tiene: la logística militar, las pirámides, las grandes rutas comerciales, el correo, el vapor y el ferrocarril, el canal de Panamá, el contenedor marítimo, el desarrollo económico y la globalización y el mundo digital [6]. En los años 90, es cuando ingresa la tecnología como un factor clave, cobrando a partir del siglo XXI un papel aún más importante.

Algunos de los avances tecnológicos que revolucionaron la logística son la trazabilidad, EDI (intercambio electrónico de datos), e-commerce, código de barras entre otros. Este proyecto se centrará en los avances tecnológicos que posibilitaron cierta automatización en las operaciones de interés, como son los AGV (siglas que significan: Automatic Guided Vehicle, traducido al español 'vehículo de guiado automático') y los transelevadores o conocidos también por sus siglas ASRS (Automated Storage and Retrieval System, traducido al español 'vehículo automatizado para almacenamiento y sistema de recuperación'). Más adelante se desarrollarán en profundidad estos elementos.

La evolución de la tecnología acompañó y fue protagonista de la historia de desarrollo de la logística. Se habla de la evolución de la logística 1.0 teniendo lugar en la revolución industrial a la logística 4.0, en la actualidad [7].

Cuando hablamos de logística 1.0, nos remontamos al año 1785 [8] cuando el inglés Edmund Cartwright construyó la primera teladora accionada por una máquina de vapor. Lo que este invento marca es el cambio del trabajo manual a la mecanización de la producción. Durante esta revolución industrial las cadenas de suministro eran locales y la mayoría de las empresas se abastecían de materias primas de su región cercana y totalmente ligadas a la disponibilidad y fácil acceso de la misma [9].

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

La segunda revolución industrial o industria 2.0 tuvo lugar a mediados del siglo XX y estuvo marcada por la importante especialización de la eficiencia laboral y operativa [7], donde el ritmo de fabricación fue dictado por las líneas de producción creadas por Henry Ford que permitieron multiplicar la capacidad productiva y creando la producción en masa [10]. La globalización de la industria y el incremento de la producción hicieron clara la necesidad de medios de producción masivos. Los principios de racionalización del trabajo de Frederick Taylor¹ completaron un cambio drástico en la cadena de suministro y los almacenes se transformaron con la introducción de herramientas modernas como el montacargas [7].

El desarrollo de la industria para sostener la logística bélica durante la segunda guerra mundial, permitió una mayor reducción de los tiempos de transporte y la masificación de sistemas estandarizados de almacenaje como el pallet o el contenedor [7]. El pallet es la unidad de almacenamiento más usada en la actualidad. Según su definición exacta en la norma UNE ISO 445, un pallet es una “plataforma horizontal rígida, cuya altura está reducida al mínimo compatible con su manejo mediante carretillas elevadoras, transpaletas o cualquier otro mecanismo elevador adecuado, utilizado como base para agrupar, apilar, almacenar, manipular y transportar mercancías y cargas en general”.

La tercer revolución industrial o logística 3.0 tuvo lugar a partir de los años 70, marcando un importante momento de transformación de lo analógico a lo digital, permitiendo un avance significativo en varias áreas como la ciencia, la electrónica, la robótica, el surgimiento de las computadoras personales y la informática, la creación de internet, el software, los dispositivos móviles, la creación de nuevos modelos de negocio, productos y profesiones, así como la extinción de otros [7].

Las empresas se vieron afectadas por esta revolución tecnológica con el uso masivo de software y lectores de datos. Estas tecnologías aumentan la velocidad de la información operativa y permiten rastrear actividades en línea e incluso los clientes pueden rastrear sus pedidos y entregas.

La cuarta revolución industrial o logística 4.0 es un término del siglo XXI que comenzó en Alemania [11]. Incluye la automatización de las actividades operativas mediante el uso de robots y sistemas informáticos de inteligencia artificial.

Hoy en día es posible encontrar robots y otros equipos modernos que realizan varios tipos de tareas, tanto en la industria como en otras áreas.

Estamos en una etapa muy temprana de la cuarta revolución industrial o logística 4.0. Especialmente en países no pertenecientes al primer mundo como lo es Uruguay. Muchas empresas oponen resistencia a este tipo de cambios debido a la falta de información y una cierta resistencia al cambio. En el presente trabajo, se va a dedicar parte de los esfuerzos, indagando en estas tecnologías con el fin de poder extraer conclusiones. A continuación, se desarrollarán algunas de estas nuevas tecnologías.

A partir de ahora se llamará SKU a la unidad mínima de un producto que puede ser vendida. Las siglas vienen del inglés: Stock-keeping unit. El transporte y la logística de los SKU en el interior de un almacén, es uno de los procesos más críticos y

¹ Frederick Winslow Taylor (20 de marzo de 1856-21 de marzo de 1915) fue un ingeniero Industrial y economista estadounidense, promotor de la organización científica del trabajo y es considerado el padre de la Administración Científica.

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

controlados, ya que de estos depende la disponibilidad de material en el momento adecuado para el resto de las operaciones.

Diferentes vehículos manejados por personas como lo son las transpaletas, transportan los materiales entre los diferentes sectores del almacén. Con la aparición de los vehículos automáticamente guiados (a los cuales a partir de ahora se nombrarán AGV por sus siglas en inglés) la logística y el transporte de materiales han comenzado lentamente a cambiar. Estos vehículos inteligentes se utilizan para transporte interno, no necesitan un conductor y son capaces de seguir un camino previamente trazado [12]. Es decir, de forma autónoma transportan los materiales sin la necesidad de ser controlado por un operario. Esto reduce tiempo y costos.

Como grandes ventajas traen el incremento de la eficacia y la productividad, disminución de costos operativos, reducción de probabilidad de accidentes y reducción de pérdidas por daños potenciales sobre los materiales transportados [13].

Sobre los tipos de guiado existentes, se mencionarán algunos a continuación. La selección del sistema de guiado es clave para una implementación con éxito de estos vehículos.

- i) Sistema filoguiado: El AGV se desplazará usando como guía un hilo conductor instalado por debajo del suelo. El hilo conductor genera un campo magnético. Es un método muy sencillo pero inflexible, ya que las rutas de movimiento están limitadas por las rutas del hilo ya instalado. Como alternativa se utilizan cintas magnéticas que evitan las obras para instalar el guiado [14]. En la figura 1.1 se observa este sistema.



Figura 1.1: Sistema filoguiado

- ii) Visión artificial: El AGV reconocerá mediante visión artificial una tira de espejo catadióptrico, calculando y corrigiendo en cada instante la desviación existente entre el AGV y la ruta. Las tiras de espejos reflejan la luz infrarroja. En función de la ruta que tiene programada y la distancia obtenida mediante la visión artificial, el AGV realiza los movimientos necesarios para continuar con la ruta prefijada [14].



Figura 1.2: Visión artificial

- iii) Opto guiado: El AGV se desplazará guiándose por una tira de espejo que se extiende por los recorridos, colocado de forma continua en los laterales de los caminos (o también puede ser en el suelo) o en las esquinas donde el AGV tiene que tomar una decisión (girar, parar, continuar, etc.). La instalación de estas guías de espejo no requiere de una obra como en el caso del filoguiado, y la modificación o creación de nuevas rutas es menos compleja, ya que basta con dibujar con tiras de espejo las nuevas zonas para definir los movimientos en el AGV [14]. En la figura 1.3 se puede observar este sistema

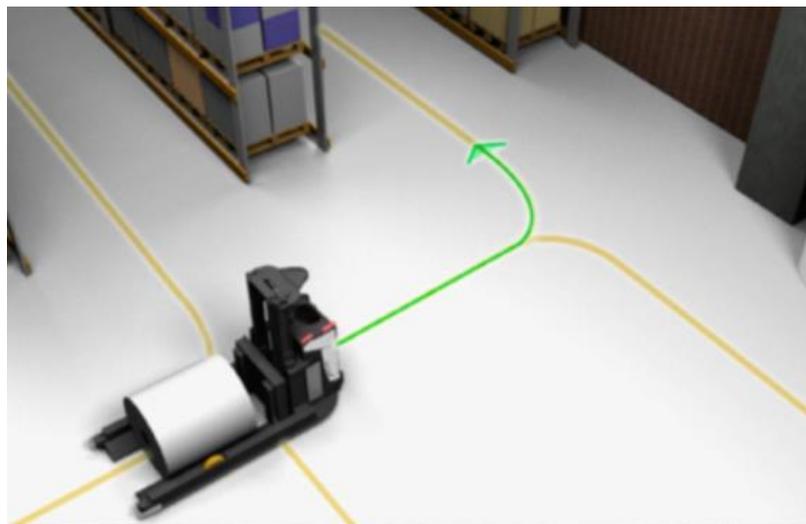


Figura 1.3: Sistema optoguiado

- iv) Guiado Láser: El AGV va equipado con una unidad laser giratoria que realiza los barridos para identificar en su entorno el mayor número de reflectores posibles para determinar su posición en el mapa de la instalación que tendrá previamente cargado en su memoria. Para realizar el mapa se colocan espejos catadióptricos en posición vertical en puntos estratégicos. Estos puntos de referencia servirán para calcular la posición del AGV. La principal ventaja de este método de guiado es la sencillez con la que se puede modificar una ruta. En apenas 10 minutos, una persona formada puede crear una nueva ruta, sin que sea preciso realizar

ninguna modificación en la instalación de los reflectores [14]. Este sistema se puede observar en la figura 1.4.

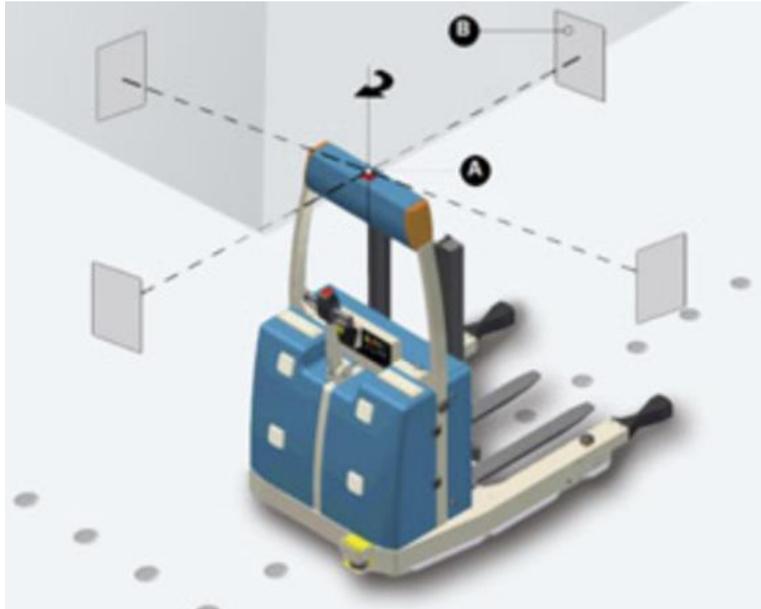


Figura 1.4: Sistema guiado laser

Estos vehículos todavía no han reemplazado por completo a los vehículos manuales, y en Uruguay no es común encontrarlos en la industria.

Los AGV, se utilizan para transporte interno generalmente desde el final de línea hasta el ingreso a los almacenes. Una vez ingresado el producto al almacén, como transporte interno al mismo, dentro de la tecnología 4.0 se tienen a los traslos o transelevadores, se puede observar una foto de este equipo en la figura 1.5. Estos, se utilizan para el almacenamiento automático tanto de pallets como de unidades con menores dimensiones. Estos robots, se desplazan a lo largo y alto del almacén por el pasillo realizando las funciones de: ingreso, egreso y movimiento interno de mercadería. El transelevador está concebido para operar sin conductor, de forma totalmente automatizada [15].

Estos almacenes poseen un software que controla todos los movimientos que se realizan y decide, según criterios programables, las ubicaciones de los pallets al momento de ingresarlos [15].

Los pallets o las unidades de almacenaje tienen una especie de pegotín con un código de barras y a través de lectores el sistema informático tendrá identificado todos los pallets del almacén sabiendo en qué posición de la estantería se encuentra cada uno garantizando la perfecta trazabilidad y facilitando por ejemplo la ejecución de un sistema FIFO². El utilizar un sistema FIFO en almacenes no automáticos, puede implicar duplicar o triplicar el tamaño del almacén [16].

Existen softwares avanzados (por ejemplo, SQL Pyme) [17] que cuando los transelevadores tienen poca ocupación (por ejemplo, turnos nocturnos no ocupados) aprovechan ese tiempo en mover los pallets estratégicamente, para acercar a las cabezas de estantería los que el sistema sabe que va a necesitar antes (en función de los pedidos ya planificados) y de esta forma cuando los tiene que entregar lo hace más rápidamente. También aprovechan ese tiempo en recolocar pallets poniendo las mercancías que tienen menos rotación en las posiciones más lejanas y los que tienen más rotación en las posiciones más cercanas a la cabecera para así ser más eficiente

² Sistema FIFO: Primero en entrar, primero en salir.

cuando se les solicita una entrega. Adicionalmente también aprovechan para ordenar el almacén considerando el sistema FIFO ya mencionado.

Las principales ventajas de estos sistemas son:

- i) Automatización de operaciones
- ii) Controles rápidos y precisos de inventario
- iii) Eliminación de errores por gestión manual
- iv) Posibilidad de adaptarse a condiciones de trabajo especiales (diferentes temperaturas, humedad, etc.).



Figura 1.5: Transelevador

2. Egreso e Ingreso de mercadería al almacén

2.1 Introducción y análisis de datos

El presente trabajo se basa en un proyecto ya culminado llamado “Planificación de la producción en planta multi-producto”. De este proyecto se debe extraer la información para calcular los flujos de ingreso y egreso, por lo que a continuación se describirá información de interés para dicho objetivo.

La planta de producción, produce 19 SKU's, a los cuales para hacer referencia se los numerará del 1 al 19.

Por otro lado, la producción está organizada en 6 líneas, las cuales solo pueden producir un SKU a la vez, y cada SKU puede ser producido por una y solo una de las líneas. La figura 2.1 a continuación representa lo recién mencionado.

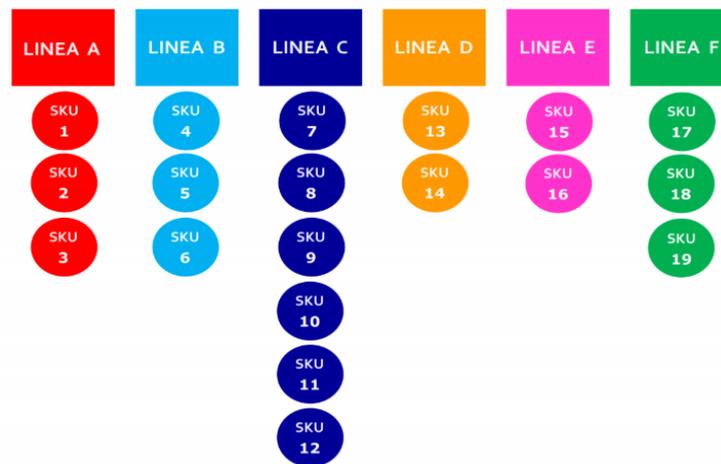


Figura 2.1: Esquema de líneas de producción

SKU	Línea	Capacidad productiva (unidades/día)	Capacidad pallet (unidades/pallet)
1	A	1000	100
2	A	400	200
3	A	400	200
4	B	32000	8000
5	B	32000	8000
6	B	32000	8000
7	C	50000	3000
8	C	50000	3000
9	C	50000	3000
10	C	50000	3000
11	C	50000	3000
12	C	50000	3000
13	D	14000	350
14	D	14000	350
15	E	24000	500
16	E	24000	500
17	F	40000	2500
18	F	40000	2500
19	F	40000	2500

Tabla 2.1: Capacidad productiva por SKU

Se definirá el parámetro capacidad productiva, el mismo estará definido en unidades/día y tendrá un valor diferente para cada SKU. Otro parámetro de interés es la cantidad de unidades por SKU que entran en un pallet. En la tabla 2.1 se puede ver esta información.

Con los datos de la tabla 2.1 se calculó el flujo de producción por línea, por SKU, se muestran a continuación en la tabla 2.2.

SKU	Línea	Capacidad productiva (unidades/día)	Flujo productivo (unidades/hora)	Capacidad pallet (unidades/pallet)	Capacidad pallet (unidades/pallet)
1	A	1000	133	100	1,3
2	A	400	53	200	0,3
3	A	400	53	200	0,3
4	B	32000	4267	8000	0,5
5	B	32000	4267	8000	0,5
6	B	32000	4267	8000	0,5
7	C	50000	6667	3000	2,2
8	C	50000	6667	3000	2,2
9	C	50000	6667	3000	2,2
10	C	50000	6667	3000	2,2
11	C	50000	6667	3000	2,2
12	C	50000	6667	3000	2,2
13	D	14000	1867	350	5,3
14	D	14000	1867	350	5,3
15	E	24000	3200	500	6,4
16	E	24000	3200	500	6,4
17	F	40000	5333	2500	2,1
18	F	40000	5333	2500	2,1
19	F	40000	5333	2500	2,1

Tabla 2.2: Flujo de producción por SKU

El resultado principal del trabajo previo en el cual se basa el presente proyecto, es un plan de producción mensual, que se muestra en la tabla 2.3. Lo que esta tabla indica es cuántos días de producción de una determinada línea serán necesarios por mes para alcanzar los objetivos de producción deseados, esta información se encuentra por SKU.

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

SKU	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	4,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	4,5	4,5	4,5	4,5
3	4,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	4,5	4,5	4,5	4,5
4	6,8	5	5,2	0	5,6	8,1	6,8	8,2	11,4	5	0	13,1
5	10,2	6,8	0	5	5	7,1	5	8,8	0	12	15,1	0
6	5	5	5,2	0	6,5	6,8	10,2	5	10,6	5	6,9	8,9
7	10	0	0	12	0	11,6	0	0	10	0	10,8	0
8	0	0	10	0	0	0	0	10	0	0	10	0
9	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	10
10	10	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	10
12	0	10	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0
13	4,3	4,3	15,4	9,1	5,4	12,9	4,3	4,3	12,3	4,9	12,9	12,9
14	4,3	4,3	4,3	12,9	16,6	9,1	4,3	4,3	7,4	17,1	9,1	9,1
15	2,5	2,5	2,5	7,5	7,5	7,5	2,5	2,5	2,5	7,5	7,5	7,5
16	2,5	2,5	2,5	7,5	7,5	7,5	2,5	2,5	2,5	7,5	7,5	7,5
17	3,3	0	2,3	0	0	2,3	0	0	2,5	2,5	2,5	2,5
18	3,3	0	2,3	0	0	2,3	0	0	2,5	2,5	2,5	2,5
19	3,3	0	2,3	0	0	2,3	0	0	2,5	2,5	2,5	2,5

Tabla 2.3: Plan de producción mensual

Lo que cada posición indica es: cuantos días se producirá un determinado SKU para un determinado mes para cumplir con la demanda estipulada.

En la tabla 2.4, se indica por línea y por mes la cantidad de días de ocupación. Se observa que salvo excepciones (líneas con 22 días de ocupación el cual es el máximo de días disponibles en el mes de acuerdo a los días de trabajo que se consideraron) las líneas tienen capacidad ociosa.

Línea	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Línea A	11	5	5	5	5	5	5	5	11	11	11	11
Línea B	22	16,8	10,4	5	17,1	22	22	22	22	22	22	22
Línea C	20	10	10	12	0	11,6	10	31	22	0	20,8	20
Línea D	8,6	8,6	19,7	22	22	22	8,6	8,6	19,7	22	22	22
Línea E	5	5	5	15	15	15	5	5	5	15	15	15
Línea F	6,6	0	4,6	0	0	4,6	0	0	5	5	5	5

Tabla 2.4: Días de ocupación por línea, por mes

Por lo que el problema que se enfrentará a continuación implicaría “ordenar” la programación dentro del mes. Se va a tratar de optimizar esta programación con el objetivo de minimizar el valor pallet/hora total que ingresaría al almacén en todo momento. De esta forma, estaríamos optimizando el flujo de entrada al almacén, tratando de requerir la menor cantidad de recursos posibles para este proceso.

Se observó que los problemas de optimizar los flujos dentro de cada mes, son independientes, por lo que se buscará una solución para el mes de enero y luego se demostrará que no es necesario trasladar el análisis a los meses restantes.

Por otro lado, se expone en dos tablas la demanda esperada del almacén. En la tabla 2.5 se muestra la demanda de los SKUs del 1 al 9, y en la tabla 2.6 la demanda de los SKUs del 10 al 19. La demanda es mensual y está en unidades.

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

SKU	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Enero	1.000	9.000	9.000	210.000	210.000	210.000	150.000	75.000	50.000
Febrero	1.000	9.000	9.000	210.000	210.000	210.000	150.000	75.000	50.000
Marzo	1.000	9.000	9.000	210.000	210.000	210.000	70.000	75.000	50.000
Abril	1.000	3.000	3.000	70.000	70.000	70.000	70.000	35.000	15.000
Mayo	1.000	3.000	3.000	70.000	70.000	70.000	70.000	35.000	15.000
Junio	1.000	3.000	3.000	70.000	70.000	70.000	150.000	35.000	15.000
Julio	1.000	3.000	3.000	70.000	70.000	70.000	150.000	35.000	15.000
Agosto	1.000	3.000	3.000	70.000	70.000	70.000	150.000	35.000	15.000
Setiembre	1.000	3.000	3.000	70.000	70.000	70.000	70.000	35.000	15.000
Octubre	1.000	3.000	3.000	70.000	70.000	70.000	70.000	35.000	15.000
Noviembre	1.000	9.000	9.000	210.000	210.000	210.000	70.000	75.000	50.000
Diciembre	1.000	9.000	9.000	210.000	210.000	210.000	150.000	75.000	50.000
Total	12.000	66.000	66.000	1.540.000	1.540.000	1.540.000	1.320.000	620.000	355.000

Tabla 2.5: Demanda SKU 1 al SKU 9

SKU	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Enero	50.000	50.000	50.000	90.000	90.000	90.000	90.000	50.000	50.000	50.000
Febrero	50.000	50.000	50.000	90.000	90.000	90.000	90.000	50.000	50.000	50.000
Marzo	50.000	50.000	50.000	30.000	30.000	30.000	30.000	50.000	50.000	50.000
Abril	25.000	25.000	25.000	30.000	30.000	30.000	30.000	15.000	15.000	15.000
Mayo	25.000	25.000	25.000	30.000	30.000	30.000	30.000	15.000	15.000	15.000
Junio	25.000	25.000	25.000	90.000	90.000	90.000	90.000	15.000	15.000	15.000
Julio	25.000	25.000	25.000	90.000	90.000	90.000	90.000	15.000	15.000	15.000
Agosto	25.000	25.000	25.000	90.000	90.000	90.000	90.000	15.000	15.000	15.000
Setiembre	25.000	25.000	25.000	30.000	30.000	30.000	30.000	15.000	15.000	15.000
Octubre	25.000	25.000	25.000	30.000	30.000	30.000	30.000	15.000	15.000	15.000
Noviembre	50.000	50.000	50.000	30.000	30.000	30.000	30.000	50.000	50.000	50.000
Diciembre	50.000	50.000	50.000	90.000	90.000	90.000	90.000	50.000	50.000	50.000
Total	425.000	425.000	425.000	720.000	720.000	720.000	720.000	355.000	355.000	355.000

Tabla 2.6: Demanda SKU 10 al SKU 19

En esta parte se tomó la decisión de definir un turno de trabajo de 7,5 horas y 22 días de trabajo mensuales, esto nos da un total de 165 horas por mes.

Para planificar los flujos de ingreso al almacén son necesarios 3 elementos:

- i) Flujo instantáneo de pallets
- ii) Elección de maquinaria
- iii) Análisis de trayectoria y tiempos

2.2 Ingreso de mercadería: Flujo de ingreso

En esta sección se calcularán los flujos de ingreso, los que serán utilizados para el posterior dimensionamiento de la entrada al almacén y para seleccionar la maquinaria necesaria para el área de recepción de productos terminados para su posterior almacenamiento.

Volviendo al problema de optimizar la planificación dentro de cada mes, se formuló un modelo matemático con el objetivo de obtener una solución en el programa GLPK. El objetivo de este problema es minimizar el valor flujo instantáneo de ingreso de pallets al almacén en todo momento. Se usará el mes de enero como ejemplo para todas las explicaciones, y posteriormente se concluirá porque es suficiente realizar el análisis para un solo mes. Si se mira la tabla 2.4, se ve la necesidad de producción en días de cada línea. A continuación, se extraen los datos solamente para enero en la tabla 2.7.

Línea	Ene
Línea A	11
Línea B	22
Línea C	20
Línea D	9
Línea E	5
Línea F	7

Tabla 2.7: Días de ocupación por línea, mes enero

Lo que se interpreta de la tabla 2.7, es que todas las líneas, a excepción de la línea B, cuentan con capacidad ociosa, es decir cada una de las líneas con capacidad ociosa van a necesitar una decisión de en qué momento producir. Por ejemplo, si por algún motivo se toma la decisión de que todas las líneas arranquen a producir el primer día del mes, y produzcan de continuo, la situación será la mostrada en la figura 2.2.

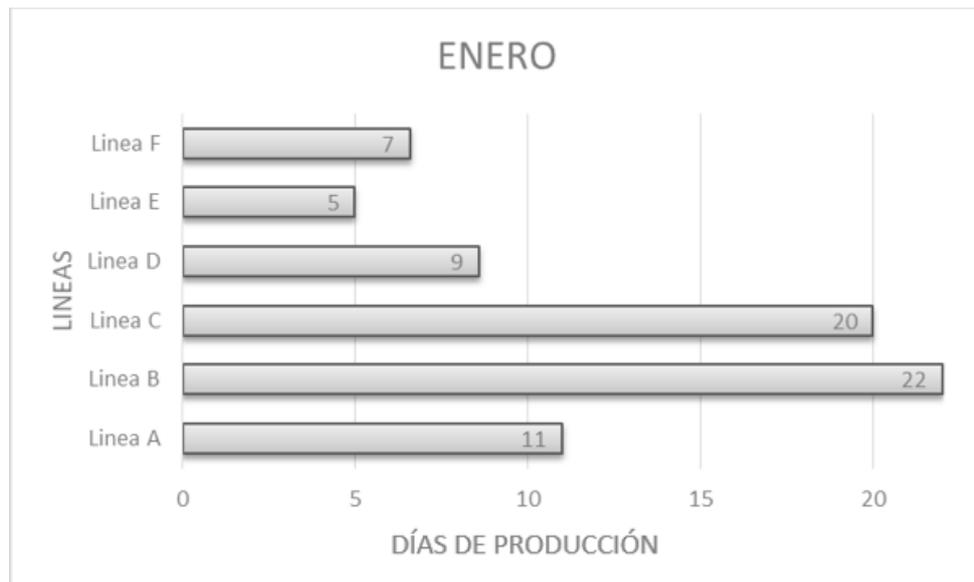


Figura 2.2: Días de ocupación por línea para el mes de enero representados en una gráfica

Si se integra a la figura 2.2, el flujo de pallet hora por línea, se deduce rápidamente que el flujo de pallet de ingreso al almacén tendrá su pico a principio de mes, y su punto más bajo a fin de mes. Lo que se quiere buscar con el modelo, es “ordenar” o “acomodar” los períodos de producción, de forma que el flujo total de pallet hora sea lo más uniforme y lo más bajo posible.

Se comienza el modelo definiendo los conjuntos.

Sea H , el conjunto de las horas disponibles en un mes (Como se explicó anteriormente se consideran 165 horas de producción al mes:

$$H = \{1, 2, 3, \dots, 163, 164, 165\}$$

Sea S , el conjunto de los SKUs:

$$S = \{1, 2, 3, \dots, 17, 18, 19\}$$

Sea L , el conjunto de las líneas:

$$L = \{A, B, C, D, E, F\}$$

En donde:

$$i \in H$$

$$k \in L$$

$$j \in S$$

Se definen conjuntos auxiliares que serán útiles para definir las restricciones:

$$T = S - \{1,2,3\}$$

$$U = S - \{4,5,6\}$$

$$V = S - \{7,8,9,10,11,12\}$$

$$W = S - \{13,14\}$$

$$X = S - \{15,16\}$$

$$Y = S - \{17,18,19\}$$

Se define el siguiente parámetro, el cual representará el flujo de pallets por hora por SKU j .

$$p_j \quad j \in S$$

Se define la siguiente variable de decisión binaria, la cual tomará el valor 1 cuando se produce en la hora i el SKU j en la línea k y 0 en caso contrario.

$$x_{ijk} \quad i \in H, j \in S, k \in L$$

Definidos los conjuntos, parámetros y variables de decisión, se continuará con las restricciones del modelo. Una primera restricción que surge es la necesidad de que los SKUs se produzcan en sus líneas de producción correspondientes, esto se escribe de la siguiente manera:

$$x_{ijA} = 0 \quad \forall i, \forall j \in T$$

$$x_{ijB} = 0 \quad \forall i, \forall j \in U$$

$$x_{ijC} = 0 \quad \forall i, \forall j \in V$$

$$x_{ijD} = 0 \quad \forall i, \forall j \in W$$

$$x_{ijE} = 0 \quad \forall i, \forall j \in X$$

$$x_{ijF} = 0 \quad \forall i, \forall j \in Y$$

Siendo los conjuntos T al Y , conjuntos auxiliares que contienen los SKUs que no se producen en la línea de la restricción. A modo de ejemplo, en la primera restricción para la línea A, el conjunto T contiene todos los SKUs (del 4 al 19) que no se producen en la línea A.

La siguiente restricción, es el imponer que para la misma línea y para la misma hora se produzca como mucho 1 SKU. Esto se representa de la siguiente forma.

$$\sum_j x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k, \forall i$$

Por último, la restricción que queda definir, es la restricción de continuidad la cual es sencilla de razonar, pero compleja de llevar a programación lineal. Se quiere que una vez que se empiece a producir el SKU j en la hora i , se siga produciendo hasta cumplir con el tiempo necesario para cumplir con la producción estipulada para ese mes, en este caso enero. En una primera instancia se planteó de la siguiente forma:

$$\text{Si } (x_{ijk} = 1) \text{ y } (x_{(i-1)jk} = 0) \text{ entonces } \sum_{i=i}^{N_j+i} x_{ijk} = N_j$$

El parámetro N_j , será necesario definirlo para cada SKU como la cantidad de horas necesarias de producción en el mes. Dado que la función "Si" no es posible implementarla en GLPK, se pensó otra forma de implementar esta restricción la cual se muestra a continuación:

$$\sum_{i=0}^{H-1} |x_{ijk} - x_{(i+1)jk}| \leq 2 \quad \forall k, \forall j$$

$$x_{1jk} + x_{165jk} \leq 1 \quad \forall k, \forall j$$

H es el número total de horas en el mes. La idea de la primera restricción es asegurarse que a lo largo de todo el mes los cambios entre producir ($x_{ijk}=1$) y no producir ($x_{ijk}=0$) no pueden ser mayores a 2, ya que cada vez que suceda un cambio entre producir y no producir, el valor absoluto de la resta, será 1 (Queremos como máximo 2 cambios). La segunda restricción es para asegurarse que no se dé el caso en que hay dos "tramos" de producción, uno a principio del mes y otro en el final, con un hueco sin producción en el medio.

Finalmente, se plantea la función objetivo, que implica tener el menor flujo de producción pallets por hora, en cada hora.

$$\text{Mín } \sum_j \sum_k x_{ijk} p_j \quad \forall i$$

El modelo formulado se encuentra a continuación:

$$\text{Mín } \sum_j \sum_k x_{ijk} p_j \quad \forall i$$

S.a

$$x_{ijA} = 0 \quad \forall i, \forall j \in T$$

$$x_{ijB} = 0 \quad \forall i, \forall j \in U$$

$$x_{ijC} = 0 \quad \forall i, \forall j \in V$$

$$x_{ijD} = 0 \quad \forall i, \forall j \in W$$

$$x_{ijE} = 0 \quad \forall i, \forall j \in X$$

$$x_{ijF} = 0 \quad \forall i, \forall j \in Y.$$

$$\sum_j x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k, \forall i$$

$$\sum_{i=0}^{H-1} |x_{ijk} - x_{(i+1)jk}| \leq 2 \quad \forall k, \forall j$$

$$x_{1jk} + x_{jk165} \leq 1 \quad \forall k, \forall j$$

Se realizaron ensayos en GLPK, y se comprobó que el modelo no funcionaba. Investigando para poder resolver este problema, se observó que la función objetivo implica una multi-optimización, ya que el problema está formado por una función objetivo para cada hora (165 funciones objetivo). Este tipo de problemas tienen un enfoque teórico³, y hasta el momento son imposibles de resolver por técnicas y métodos conocidos sin cambiar el enfoque del problema, por lo cual, dada la complejidad encontrada, se abandonó esta línea de abordaje.

Luego de evaluar varios métodos de resolución considerando simplificar el problema, usar solver de Excel entre otras alternativas, se combinaron dos técnicas, para llegar a una posterior decisión: acomodar manualmente los períodos de producción, realizando un análisis de mejor y peor caso.

El análisis de mejor caso, consiste en ordenar los períodos de producción de la mejor forma posible. Esto es, buscar el perfil de flujo que minimice el máximo de los pallets por hora que ingresan el depósito. Lo que se hizo fue una planilla de excel de modo de ordenar los períodos de producción. Para cada disposición, se obtiene un flujo de pallet hora para cada día. A continuación, una captura de la mejor solución encontrada, en la figura 2.3.

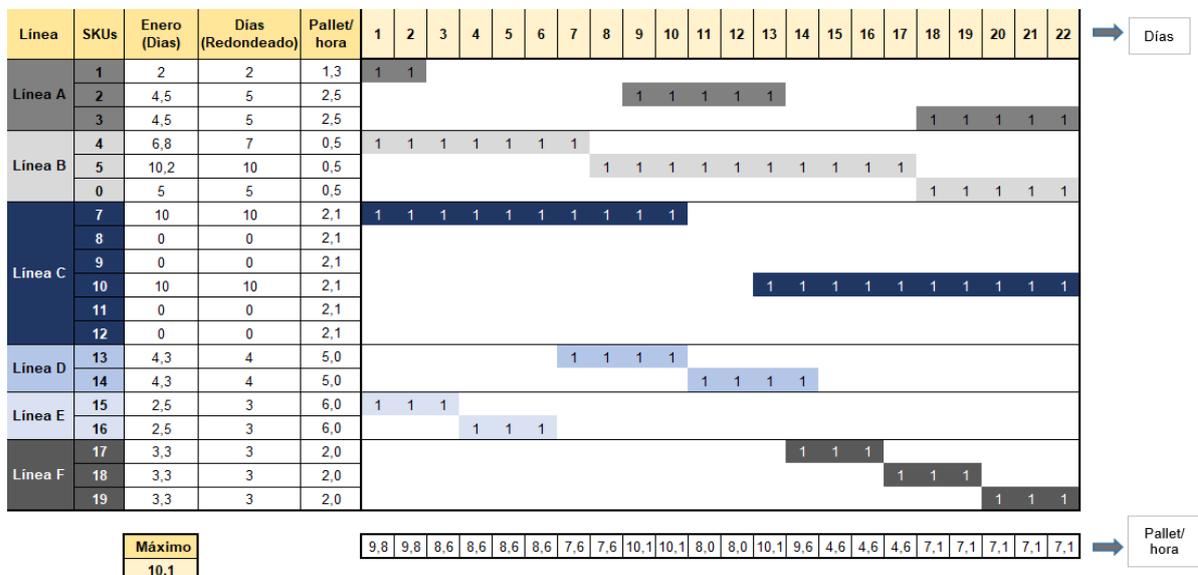


Figura 2.3: Análisis mejor caso para el mes de enero

³ Algunos métodos de resolución, pueden ser métodos basados en el concepto de eficiencia de Pareto, métodos basados en la combinación de objetivos o métodos basados en la asignación de prioridades. Cualquiera de estos métodos implica cambiar el enfoque del problema planteado.

El resultado, del estudio de mejor caso, es que, ordenando la producción de la forma óptima encontrada manualmente, el día de enero que tendrá mayor flujo de pallets de ingreso al almacén, será de 10,1 pallet por hora, y este valor es el mínimo máximo que se puede obtener para enero.

Para el análisis del peor caso, se utilizó el mismo procedimiento, es decir la misma planilla. La diferencia que, en lugar de buscar optimizar el orden de los períodos productivos, distribuyéndolas lo menos solapadas posible, se busca la superposición máxima, en particular, utilizando los SKUs con mayor flujo de pallets. El resultado se muestra en la figura 2.4.

El resultado del estudio del peor caso, es que ordenando la producción de la forma menos óptima posible, el día de enero que tendrá mayor flujo de pallets de ingreso al almacén, será de 18,1 pallet por hora.

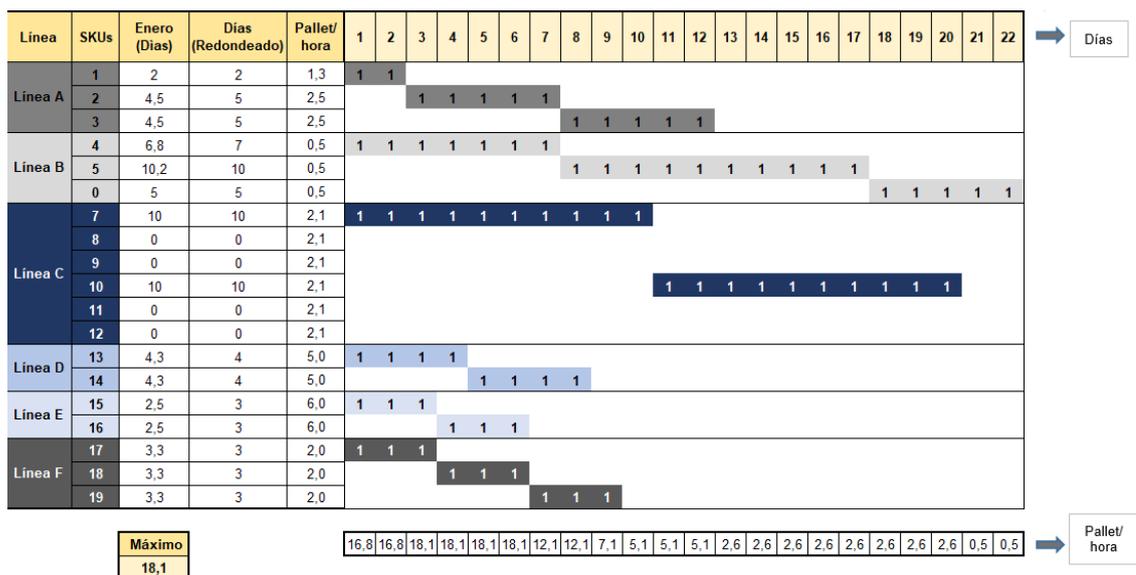


Figura 2.4: Análisis peor caso para mes de enero

Unificando ambos análisis, se decidió diseñar el flujo de ingreso para el peor caso, teniendo en cuenta que hay otros factores externos a la hora de ordenar el plan de producción que no son predecibles, como la disponibilidad de personal, la planificación del mantenimiento, disponibilidad de materias primas, entre otros.

Realizar este análisis para el resto de los 11 meses no será necesario. Esto es porque al decidir utilizar el peor caso, y analizando la figura 2.4, se observa que el peor caso posible de enero, es el peor caso posible en todo el año, ya que todas las líneas de producción trabajan en paralelo, cada una con el flujo máximo de pallets.

2.3 Ingreso de mercadería: Elección de maquinaria

Definir la maquinaria con la que se trasladará la mercadería desde el final de línea hasta el almacén es fundamental, ya que de esto dependerán los tiempos y en relación a esto la cantidad de máquinas necesarias. La velocidad de traslado, así como el tiempo de carga y descarga son características de cada tipo de vehículo. Estos serán los elementos principales a tener en cuenta, ya que el próximo punto será realizar un análisis de tiempos para definir la cantidad de equipos necesarios. La inversión, como otro factor de peso para la decisión, será algo que en esta sección no será prioridad, y

se dejará para un posterior análisis. La altura que alcancen los equipos, tampoco será de interés en esta parte, ya que los vehículos tendrán el objetivo de llevar los pallets desde el final de línea hasta el ingreso de la cámara de frío, por lo que todas las operaciones serán a nivel de piso o en su defecto a pocos metros de altura.

Se distinguirán entre dos tipos de equipos: los vehículos automáticos y los vehículos manuales.

Dentro de los equipos manuales se estudiaron dos posibles casos: La transpaleta conductor parado y transpaleta conductos sentado.

La transpaleta conductor parado es de los modelos más sencillos y por lo tanto más baratos, la desventaja que tiene es que el operario trabaja parado y para largos períodos la fatiga debería de tomarse en consideración. A continuación, en la figura 2.5 se encuentra imagen ejemplo y especificaciones de la misma [18].



Vel. con carga	9Km/h-2,5m/s
Vel. sin carga	9Km/h-2,5m/s
T. carga y desc	10s
Capacidad de carga	2000kg

Figura 2.5: Transpaleta conductor parado imagen e información

La transpaleta conductor sentado también es un modelo sencillo, pero permite que el operario realice la actividad en una posición de mayor comodidad. A continuación, en la figura 2.6 se encuentra imagen y especificaciones [19].



Vel. con carga	8Km/h-2,2m/s
Vel. sin carga	11Km/h-3m/s
T. carga y desc	10s
Capacidad de carga	2000kg

Figura 2.6: Transpaleta conductor sentado imagen e información

Para el caso de vehículos automáticos, por la sencillez de la operación a realizar, se toma el vehículo más simple encontrado. A continuación, en la figura 2.7 se encuentra imagen ejemplo y especificaciones [20].



Vel. literatura	5.4m/h-1.5m/s
Vel. proveedor	3.6Km/h-1m/s
T. carga y desc	10s
Capacidad de carga	1010kg

Figura 2.7: AGV imagen e información

En este caso no se tienen velocidades con o sin carga. En la literatura encontrada, se plantea 1,5m/s [21] como una velocidad promedio y la velocidad dada por proveedores se plantea como velocidad máxima, por lo que para el análisis se toma un 80% de la misma para contemplar esto.

2.4 Ingreso de mercadería: Análisis de trayectoria y tiempos

En los layouts que se muestran en las figuras 2.8 y 2.9, se visualiza el recorrido desde el final de línea y el box de ingreso/inspección al almacén/cámara de frío. Las medidas, fueron parte de los datos en los que se basa el problema.

En la figura 2.8 se muestra en rojo un recorrido rectangular, y en la figura 2.17 se muestra un recorrido triangular.

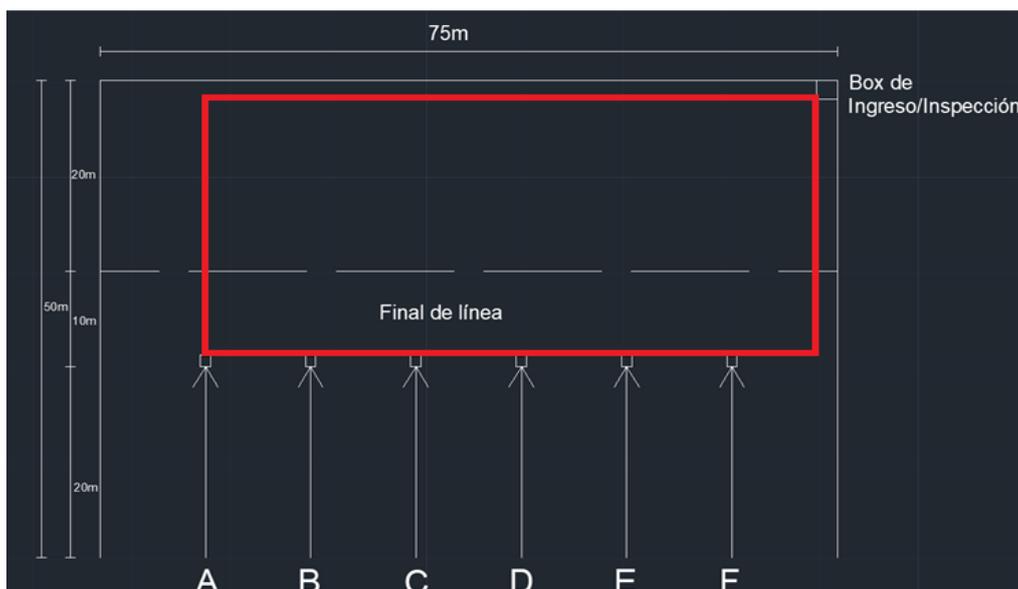


Figura 2.8: Layout ingreso con recorrido rectangular

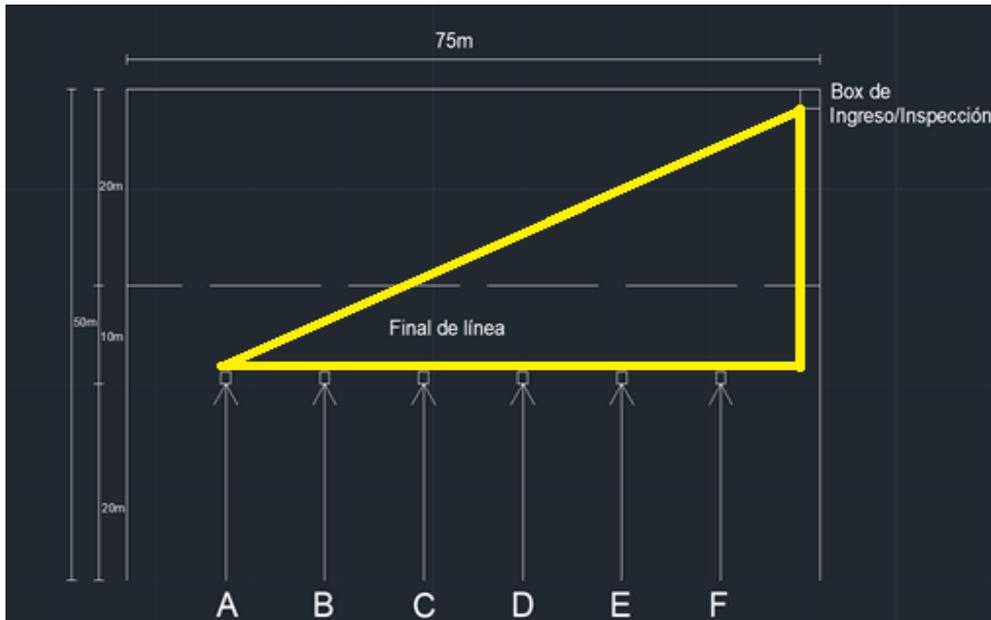


Figura 2.9: Layout ingreso con recorrido triangular

El recorrido rectangular formando un circuito, es una práctica recomendada para los AGV ya que los vehículos automáticos en algún momento deberían de detenerse y pasar por la estación de carga, la cual supondríamos que se ubica en el ángulo superior izquierdo en la figura 2.8. Se decidió realizar todos los cálculos para el circuito 2.8, y en función de los resultados se decidirá cómo seguir (es decir si es necesario y vale la pena considerar el circuito 2.9).

Debajo, en las tablas 2.8 y 2.9, se encuentra la información necesaria para estimar la cantidad de pallets por hora que puede transportar cada uno de los casos⁴.

Datos AGV	Velocidad teórica literatura (m/s)	1,5
	Velocidad proveedor (m/s)	0,6
	Tiempo carga (s)	10
	Tiempo descarga (s)	10
	Recorrido (m)	184

Tabla 2.8: Datos tiempos AGV

Datos manual	Velocidad con carga(m/s)	1,8
	Velocidad sin carga (m/s)	2,4
	Tiempo carga (s)	10
	Tiempo descarga (s)	10
	Recorrido (m)	184
	Tiempo recorrido (s)	89

Tabla 2.9: Datos tiempos manual

Finalmente, debajo los resultados obtenidos para cada caso.

Resultados AGV	Tiempo recorrido teórico (s)	123
	Tiempo recorrido teórico + carga y descarga (s)	143
	Número de pallets hora teórico	25
	Tiempo recorrido literatura (s)	317
	Tiempo recorrido literatura + carga y descarga (s)	337
	Numero de pallets hora literatura	11

Tabla 2.10: Resultados tiempo AGV

⁴ Los tiempos de carga y descarga fueron estimados por los autores en base a su experiencia laboral utilizando como método la observación.

Resultados manual	Tiempo total	109,64
	Número pallets hora	33

Tabla 2.11: Resultados tiempos manual

Para el caso de los AGV se tienen dos velocidades: una teórica que se entiende es la velocidad máxima ideal obtenida de la bibliografía [21], y otra obtenida de proveedores [20]. Observamos que, en el primer caso un AGV con las condiciones de recorrido y tiempos de carga y descarga del pallet puede ingresar 25 pallets por hora, mientras que en el segundo caso puede ingresar 10 pallets por hora a almacén. Los AGV tienen la particularidad de necesitar un tiempo de carga de batería, teniendo en cuenta esto, y considerando ambos resultados es que se recomienda adquirir dos de estos vehículos para el ingreso de pallets al almacén.

En el caso del vehículo manual, el resultado arroja que un vehículo puede mover hasta 32 pallets por hora, que es más de lo necesario. De todas formas, también se recomienda la adquisición de dos vehículos, debido a que es bueno que haya uno de repuesto por roturas, mantenimiento o imprevistos.

Dado los resultados arrojados, se decidió que no es necesario realizar el análisis con el recorrido triangular. Este nuevo escenario implica una menor distancia y siendo el resto de los cálculos análogos, los resultados serán mejores en cuanto a la cantidad pallet/hora que se pueden trasladar. Dado que se decidió sobredimensionar a dos equipos para ambos tipos de vehículos, es que no merece la pena realizar análisis análogo para recorrido triangular.

El recorrido rectangular tiene como ventaja la posibilidad de incluir en el recorrido preestablecido estaciones de carga, las que necesitan encontrarse sobre una pared.

El análisis de tiempos se encuentra en el anexo electrónico⁵.

Se concluye que para el ingreso de pallets al depósito se cuenta con dos opciones: vehículos manuales y vehículos automáticamente guiados. En ambos casos es necesario dedicar dos equipos para esta actividad.

2.5 Flujo de egreso

En la sección 2.1, se presentaron los flujos esperados de demanda. Los flujos de egreso, están relacionados con el picking. El modo de picking guarda una relación muy estrecha con el diseño del depósito en sí mismo, por lo que en esta sección solamente se expondrán los resultados que sean genéricos para los datos del problema presentados hasta el momento. De la misma forma que se calculó el flujo de ingreso según la producción, en la tabla 2.12, se observan el flujo de egreso en pallets por hora de cada SKU.

Si bien la hipótesis inicial fue de un total de 19 SKU's, y así fueron considerados para el dimensionamiento del ingreso de pallets al almacén, para el egreso se realizó la suposición de cada uno de los 19 SKUs iniciales, se descomponen en 10 productos. Es decir, se tendrán 19 familias de SKU's, y 190 productos finales.

Lo recién mencionado se muestra en la tabla 2.12. A modo de ejemplo, si se toma el producto original 1, tiene un egreso del depósito de 20 pallets por mes, es decir 0,91

⁵ Anexo electrónico, archivo de Excel: "Análisis de tiempos ingreso y egreso".

pallets por día. Esta familia de producto, se dividirá en 10 sub productos, cada uno de los cuales tendrán un flujo de egreso de 0,09 pallet diario.

Analizando la figura, se observa que las familias 13 y 14 son las que contienen los subproductos con mayor rotación, teniendo un valor de 2,34 pallets diarios. Se decide con estos resultados, que no es necesario destinar más de una posición de picking por producto. Es decir, serán necesarias 190 posiciones de picking. Esto se hizo bajo el supuesto de que es esperable que el almacén tenga la capacidad de reposición necesaria para cada caso.

SKU's	Flujo (pallet/mes)	Flujo (pallet/día)	Flujo de producto final (pallets/día)
1	20	0,91	0,09
2	90	4,09	0,41
3	90	4,09	0,41
4	53	2,39	0,24
5	53	2,39	0,24
6	53	2,39	0,24
7	100	4,55	0,45
8	50	2,27	0,23
9	33	1,52	0,15
10	33	1,52	0,15
11	33	1,52	0,15
12	33	1,52	0,15
13	514	23,38	2,34
14	514	23,38	2,34
15	360	16,36	1,64
16	360	16,36	1,64
17	40	1,82	0,18
18	40	1,82	0,18
19	40	1,82	0,18

Tabla 2.12: Egreso pallets por día por SKU final

3. Dimensionamiento del depósito

3.1 Introducción

En este capítulo se detallará acerca de las distintas metodologías utilizadas para obtener las dimensiones de la cámara de frío del almacén de producto terminado. El mismo se dividió en dos grandes temáticas: definir la profundidad de estantería óptima y luego obtener las dimensiones globales (largo, ancho, altura) y cantidad de pasillos para las distintas opciones de layout considerando escenarios manuales y automáticos.

3.2 Profundidad de estantería

En primer lugar, se explicará cómo se obtuvo la profundidad óptima de estanterías. Para esto, se utilizó una ecuación [22] estudiada durante la revisión bibliográfica del proyecto. Cabe destacar que esta ecuación fue deducida con el fin de ser aplicada para depósitos en los que se apilan los pallets. Este no será el caso de nuestro almacén ya que se querrá ocupar la menor superficie posible y para lograr esto se pretende almacenar en alturas elevadas. Las normas internacionales no recomiendan apilar en alturas mayores a 7.6 metros [23] (lo que sería para el caso de estudio un máximo de 5 posiciones de pallet), también hay que tener en cuenta que esta restricción de altura es para cargas uniformes y resistentes, requisitos que no todos los productos almacenados pueden cumplir por lo que la altura segura podría ser inclusive menor. Otro punto por el que este tipo de almacenamiento no se utilizará es que también se evaluó la posibilidad de realizar un depósito con transelevadores automáticos lo que requiere la utilización de racks. Aclarado esto, en la siguiente sección se desarrollará la deducción de la ecuación encontrada. También, a partir de la misma se deducirá una ecuación similar para el caso de almacenamiento en racks. Se aplicarán ambas fórmulas al caso de estudio y se compararán resultados para los diferentes layouts.

3.2.1 Profundidad de estantería: Depósito apilable

La deducción parte de la afirmación de que los pasillos proveen accesibilidad, pero no capacidad de almacenamiento, por lo que este espacio no es directamente un factor por el que se obtenga un provecho económico. Por esto, se buscará que el tamaño del pasillo sea el mínimo para proveer una adecuada manipulación del pallet. Almacenar en estanterías con mayor profundidad tiene la ventaja de poder dedicar una línea de almacenamiento a un mismo producto y así, aprovechar mejor el espacio, ya que se accederá a todas estas posiciones por el mismo pasillo. Sin embargo, este espacio mejor aprovechado estará disponible por menos tiempo ya que el espacio libre, en los momentos donde está línea de almacenamiento no esté completa, no se puede reasignar a otro SKU hasta que la profundidad de la estantería haya sido liberada (para no generar retrabajos). A este fenómeno se le llama "honeycombing". En la figura 3.1 [22] a continuación se ilustra este fenómeno. Se observa un conjunto de pallets almacenados en una profundidad de estantería de 4 (en el instante t). Al vaciarse la primera posición (instante $t+1$), está se encontrará libre, pero será espacio que no se podrá asignar a otro SKU hasta que se vacíe todo el pasillo.



Figura 3.1: Honeycombing

Almacenar en profundidades mayores resultará en un mayor honeycombing y almacenamientos menos profundos desperdiciarán más espacio de pasillo. La deducción a continuación, pretende hallar la profundidad óptima de estantería minimizando tanto el espacio de pasillo ocupado como el espacio en posiciones de pallets inutilizables.

En primer lugar, es pertinente definir algunos términos que serán utilizados a lo largo de la deducción:

- i) Posición de pallets: Espacio requerido para almacenar un pallet (lo que ocupa el pallet por si solo y los espacios necesarios entre el mismo y las estanterías, a los cuales de ahora en más le llamaremos aires).
- ii) Plano de almacenamiento/picking: Se llamará así, al plano definido por un frente de picking de un mismo producto con una determinada profundidad (K) y una determinada altura (Z), ambas medidas en posiciones de pallet. En la figura 3.1 a continuación se puede observar con el fin de ilustrar, un plano de almacenamiento de 3 posiciones de pallet en altura ($Z=3$) y 2 posiciones de pallet en profundidad ($K=2$).

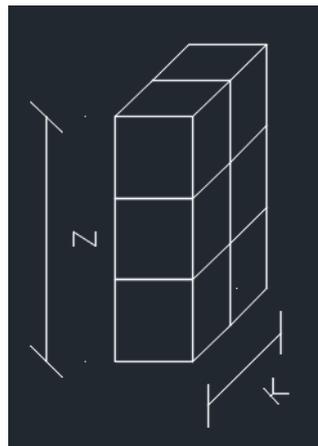


Figura 3.1: Plano de almacenamiento

Cada uno de estos planos requerirá un espacio de pasillo para poder colocar o remover pallets. Sea a el espacio de pasillo medido en posiciones de pallets. Entonces, el área total ocupada por plano de almacenamiento es $K+(a/2)$ ya que a un frente de picking se le asigna la mitad del área de pasillo (dado que se asume una disposición de estanterías enfrentadas, como se ilustra en la figura 3.2 a continuación [22]).

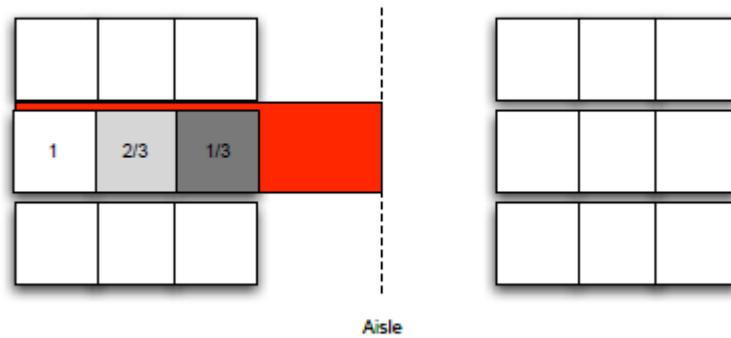


Figura 3.2: Disposición de pallets

En la mayoría de los depósitos, un plano de almacenamiento está dedicado a un solo producto para evitar pérdidas de tiempo por “double-handling”, esto es lo que genera el fenómeno de honeycombing previamente desarrollado ya que al vaciar una posición de pallet esta estará desocupada pero indisponible para cualquier otro producto. Para maximizar los beneficios, el SKU debería almacenarse en una profundidad que minimice el honeycombing. La profundidad óptima se puede estimar de la forma descrita a continuación.

Se supone que cada producto experimenta una demanda anual de pallets D_i y que esta demanda sale en ordenes de tamaño q_i pallets siendo la duración del ciclo de orden q_i/D_i años.

Asumiendo que cada SKU i es apilable en columnas de Z_i pallets de alto, entonces cada orden requerirá q_i/Z_i posiciones de pallet en el piso. Una columna de pallets (plano de almacenamiento de profundidad 1) se irá, haciendo que una posición de piso este libre cada Z_i/D_i años (análogo a la duración del ciclo de orden).

Siendo los planos de almacenamiento de profundidad K , entonces cada SKU requerirá $q_i/(Z_i * K)$ planos de almacenamiento. Cada plano tendrá una posición de piso libre pero no disponible en intervalos de tiempo de $Z_i/D_i, 2Z_i/D_i, \dots, (K-1)Z_i/D_i$. Será necesario sumar estos términos con el fin de obtener el desperdicio total.

Sacando de factor común Z_i/D_i y utilizando la fórmula de Gauss para la suma de números consecutivos del 1 a $(K-1)$ se obtiene un desperdicio de $Z_i K(K-1)/(2D_i)$ posiciones de pallets-año por plano.

Si aproximamos el número de planos por $q_i/(Z_i * K)$ y lo multiplicamos por el desperdicio por plano, se obtiene una aproximación del desperdicio total en un ciclo de orden por honeycombing (DH):

$$DH = \left(\frac{K-1}{2} \right) * \left(\frac{q_i}{D_i} \right)$$

El otro tipo de espacio desperdiciado es aquel destinado a la accesibilidad al cual se le adjudica $a/2$ posiciones de pallet. El primer plano de almacenamiento será liberado y se encontrará disponible para otro SKU después de que el primer plano de KZ_i pallets sea liberado, el segundo luego de $2KZ_i$ y así sucesivamente. Siendo $q_i/(Z_i * K)$ la cantidad de planos de almacenamiento, aplicando la fórmula de Gauss y multiplicando por el espacio de pasillo, el desperdicio por pasillo ocupado (DP) para un ciclo de orden queda como se muestra a continuación.

$$DP = \left(\frac{a}{2}\right) \frac{\left(\frac{q_i}{Z_i K} + 1\right)}{2} \left(\frac{q_i}{D_i}\right)$$

La pérdida total de espacio durante el ciclo de orden es la suma del “honeycombing” y desperdicio por pasillo ocupado ($DH+DP$). El desperdicio promedio(dt) será el desperdicio total del ciclo, dividido la duración de un ciclo de orden lo que resulta en:

$$dt = \left(\frac{K-1}{2}\right) + \frac{a}{2} * \frac{\left(\frac{q_i}{Z_i K} + 1\right)}{2}$$

Derivando la expresión respecto de K y despejando se puede hallar la profundidad que minimiza el espacio desperdiciado para cada SKU i:

$$K = \sqrt{\frac{a q_i}{2 Z_i}}$$

Hay que señalar que esta expresión da una profundidad ideal de estantería, ya que la deducción ignora restricciones de espacio dadas por el layout del almacén. También vale la pena resaltar que la misma es una respuesta aproximada, ya que, por ejemplo, se aproxima el número de pasillos por una expresión que muy probablemente no sea entera ($q_i/(Z_i * K)$).

Un punto importante acerca de esta deducción es que el análisis se realiza por SKU y en la realidad de un depósito sería poco práctico permitir que cada SKU tenga su propia profundidad de estantería, por lo que, siendo n la cantidad de SKU’s que se pretende almacenar, la profundidad óptima de estantería en promedio se puede hallar sumando el desperdicio total para cada SKU:

$$KT = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{2 Z_i} (K-1) + \frac{a}{2} \frac{1}{Z_i} \frac{\left(\frac{q_i}{Z_i K} + 1\right)}{2} \right]$$

Suponiendo que la profundidad de estantería (K) será igual para todo SKU, derivando con respecto de ella y despejando se obtiene la profundidad óptima promedio dada por la siguiente expresión:

$$K = \sqrt{\frac{a}{2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{Z_i}}$$

3.2.2 Aplicación fórmula estantería apilable

Cómo se explicó anteriormente, la aplicación de la ecuación para hallar la profundidad óptima en el caso de estudio se realizó tanto para el caso del depósito automático, cómo para el manual con el fin de comparar y extraer conclusiones de los resultados

obtenidos. Lo que diferenciará estos casos será la restricción máxima de altura siendo la de los automáticos mayor.

Lo primero que se debe definir es como se aplicará la fórmula a cada tipo de depósito.

Como se mencionó al principio del capítulo, la aplicación de la ecuación en depósitos con racks no es tan directa por las suposiciones que se realizan para la deducción de la misma, las cuales no reflejan la realidad de la operativa de un depósito de este tipo.

Una de estas suposiciones es que un pallet que tiene otro encima por estar apilado es inaccesible, esto claramente no es cierto cuando se almacena en racks ya que estos permiten retirar cargas de todas las alturas del frente del pasillo.

La otra suposición es que un mismo producto se almacena en planos de picking ordenados a lo largo del depósito. Esto, para el caso de depósitos manuales puede o no ser cierto ya que dependiendo del volumen del SKU puede ser que se almacene una pequeña cantidad en un área de "forward picking"⁶ para tenerlo "a mano" y el resto en el almacenamiento principal. Igualmente vale la pena aclarar que en el caso de estudio no existirá esta área y el picking estará integrado con el almacenamiento, lo que hace esta suposición más certera.

Para el caso de los depósitos automáticos los cuales realizan el ingreso y egreso de pallets por medio del transelevadores, durante la visita realizada a Mega Pharma el ingeniero responsable comentó que estos trabajan con un arreglo caótico centrándose en la optimización del tiempo y no del orden. Sin embargo, a efectos de aplicar la ecuación como una guía para hallar la profundidad óptima se asumirá como cierta la hipótesis para este tipo de depósitos.

A continuación, se expondrán y explicarán los parámetros necesarios para el cálculo:

- i) Cantidad de productos (n): El caso de estudio está planteado para 19 familias de SKU's, pero como se observa, la ecuación deducida está dada para cada producto⁷ a pickear, debido a esto, como ya se explicó anteriormente, n será igual a 190.
- ii) Ancho de pasillo (a): Como se pudo ver en la deducción de la ecuación este parámetro se encuentra medido en posiciones de pallet. Para el caso del depósito manual se utilizará un ancho de 4 posiciones de pallet (lo que da un pasillo de 4,8m) ya que es razonable para la manipulación de acuerdo con lo investigado en lo que respecta a espacio de maniobrabilidad para los apiladores necesarios [24]. En el caso del depósito automático se consideró al pasillo del transelevador, a pesar de que no es estrictamente el pasillo de picking, se puede suponer un "flujo estacionario" entre las cargas que el transelevador mueve hacia las posiciones de picking y lo que realmente es pickeado. Dicho esto, se aproximó el ancho de pasillo requerido por el transelevador en 1,5 posiciones de pallet, ya que se observó en la visita a Mega Pharma que el transelevador no requería de un espacio mucho mayor al ancho del pallet para trabajar.

⁶ Área en la que se almacena una pequeña cantidad de mercadería para pickear. Si existe, el picking para ese producto se realizará exclusivamente de aquí y será reabastecida del área de almacenamiento. [22]

⁷ De aquí en adelante, producto y SKU se utilizarán indistintamente.

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

- iii) Altura de columna (Z): Es la altura de la columna del almacenamiento, medida en posiciones de pallets. Tendrá distintas limitaciones dependiendo si se está hablando del depósito manual o automático. Estas restricciones serán vistas más adelante en el desarrollo de esta sección. Vale la pena aclarar que en el estudio se tomó una altura de almacenamiento única para todo el depósito.
- iv) Cantidad de orden (q_i): Este será el tamaño de orden por producto i . El mismo no es un dato dado en el caso de estudio por lo que se supondrán los tamaños de orden a partir de la demanda conocida. Esto se verá más adelante.

Una vez definidos los parámetros anteriores, el siguiente paso será aplicar la ecuación estudiada para el caso de depósito manual y el automático.

3.2.2.1 Depósito manual

Tomando los 190 productos se confeccionó una tabla por mes de trabajo⁸ en la que se muestra:

- i) Familia de SKU.
- ii) Número de producto.
- iii) Demanda mensual en unidades del producto.
- iv) Unidades por pallet: se mantuvieron los valores de la familia de SKU originales a la que pertenece cada producto.
- v) Demanda mensual en pallets: se obtiene dividiendo la demanda en unidades entre las unidades por pallet.
- vi) Demanda diaria de pallets: se calcula dividiendo la demanda mensual de pallets entre los días de trabajo en el mes, los cuales se aproximaron en 22 para todos los meses.
- vii) Política de despacho⁹: siendo el número de días entre dos órdenes consecutivas del mismo producto.
- viii) Tamaño de pallets por orden(q_i): es la cantidad de pallets por orden.

⁸ Archivo Excel en anexo electrónico: "Profundidad manual – Ecuación apilable". Aclaración: En todos los archivos de Excel citados en este capítulo se podrán encontrar todas las tablas y resultados mostrados en el informe para el correspondiente análisis.

⁹ Frecuencia de pedido y política de despacho se utilizará a lo largo del informe de manera indiferente.

A continuación, se mostrará a modo de ejemplo la tabla realizada para el mes de enero. Las tablas utilizadas para realizar los cálculos para el resto de los meses se pueden encontrar en el anexo electrónico previamente citado.

Enero							
Familia de SKU	N° Producto	Demanda (unidades/mes)	Unidades por pallet	Demanda (Pallets/mes)	Demanda (pallet/día)	Política de despacho (días)	Tamaño de orden (pallet/orden)
1	1	200	100	2,00	0,100	5	0,500
2	11	1.800	200	9,00	0,450	5	2,25
3	21	1.800	200	9,00	0,450	5	2,25
4	31	42.000	8.000	5,25	0,263	5	1,31
5	41	42.000	8.000	5,25	0,263	5	1,31
6	51	42.000	8.000	5,25	0,263	5	1,31
7	61	30.000	3.000	10,0	0,500	5	2,50
8	71	15.000	3.000	5,00	0,250	5	1,25
9	81	10.000	3.000	3,33	0,167	5	0,833
10	91	10.000	3.000	3,33	0,167	5	0,833
11	101	10.000	3.000	3,33	0,167	5	0,833
12	111	10.000	3.000	3,33	0,167	5	0,833
13	121	18.000	350	51,4	2,57	5	12,9
14	131	18.000	350	51,4	2,57	5	12,9
15	141	18.000	500	36,0	1,80	5	9,00
16	151	18.000	500	36,0	1,80	5	9,00
17	161	10.000	2.500	4,00	0,200	5	1,00
18	171	10.000	2.500	4,00	0,200	5	1,00
19	181	10.000	2.500	4,00	0,200	5	1,00

Tabla 3.1: Demandas para enero

Obtenidas estas tablas, como punto de arranque se resolvió definir el tamaño de orden para todos los productos como una orden diaria en base a la demanda. Se aplicó la ecuación obtenida variando la altura en pallets de 3 a 7. Esto se hizo así ya que para depósitos manuales a lo largo de la investigación y por medio de intercambios con el tutor y profesionales del área, se concluyó que era lo usual para la industria. Para facilitar la lectura de la tabla a continuación, se pintaron del mismo color los meses que por tener la misma demanda y misma frecuencia de pedido, al aplicar la ecuación para hallar la profundidad óptima, los resultados obtenidos son iguales.

		Altura (posiciones de pallets)				
		3	4	5	6	7
M e s	Enero	0,664	0,575	0,514	0,469	0,434
	Febrero	0,664	0,575	0,514	0,469	0,434
	Marzo	0,664	0,575	0,514	0,469	0,434
	Abril	0,607	0,526	0,470	0,429	0,397
	Mayo	0,607	0,526	0,470	0,429	0,397
	Junio	0,607	0,526	0,470	0,429	0,397
	Julio	0,476	0,412	0,369	0,336	0,311
	Agosto	0,476	0,412	0,369	0,336	0,311
	Septiembre	0,405	0,351	0,314	0,286	0,265
	Octubre	0,405	0,351	0,314	0,286	0,265
	Noviembre	0,405	0,351	0,314	0,286	0,265
	Diciembre	0,405	0,351	0,314	0,286	0,265

Tabla 3.2: Resultados de profundidad óptima con política de despacho diaria

Como era de esperar, para los meses de mayor demanda (enero, febrero y marzo) y para las alturas de almacenamiento menores, la profundidad de estantería óptima es mayor. Pero, como se puede apreciar en la tabla, para ninguno de estos casos la misma supera una posición de pallet.

Observado esto, se decidió comenzar a variar la política de despacho y observar los resultados. Se aplicó la ecuación para frecuencias de pedido de 5, 10, 15 y 20 días. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para la frecuencia de pedido de 20 días ya que es el caso que más contrasta con la política de despacho diaria. Si se quiere ver los resultados de aplicar las otras políticas de despacho, se puede consultar el anexo electrónico¹⁰.

Como era esperable, al aumentar los días por orden a 20 se necesita mayor número de posiciones de pallets en profundidad.

		Altura (posiciones de pallets)				
		3	4	5	6	7
M e s	Enero	2,97	2,57	2,30	2,10	1,94
	Febrero	2,97	2,57	2,30	2,10	1,94
	Marzo	2,97	2,57	2,30	2,10	1,94
	Abril	2,71	2,35	2,10	1,92	1,78
	Mayo	2,71	2,35	2,10	1,92	1,78
	Junio	2,71	2,35	2,10	1,92	1,78
	Julio	2,13	1,84	1,65	1,50	1,39
	Agosto	2,13	1,84	1,65	1,50	1,39
	Septiembre	1,81	1,57	1,40	1,28	1,19
	Octubre	1,81	1,57	1,40	1,28	1,19
	Noviembre	1,81	1,57	1,40	1,28	1,19
	Diciembre	1,81	1,57	1,40	1,28	1,19

Tabla 3.3: Resultados de profundidad óptima con política de despacho

A continuación, en la figura 3.3, se puede observar una gráfica en la que se comparan las profundidades óptimas en función de la altura de la estantería para las distintas políticas de despacho.

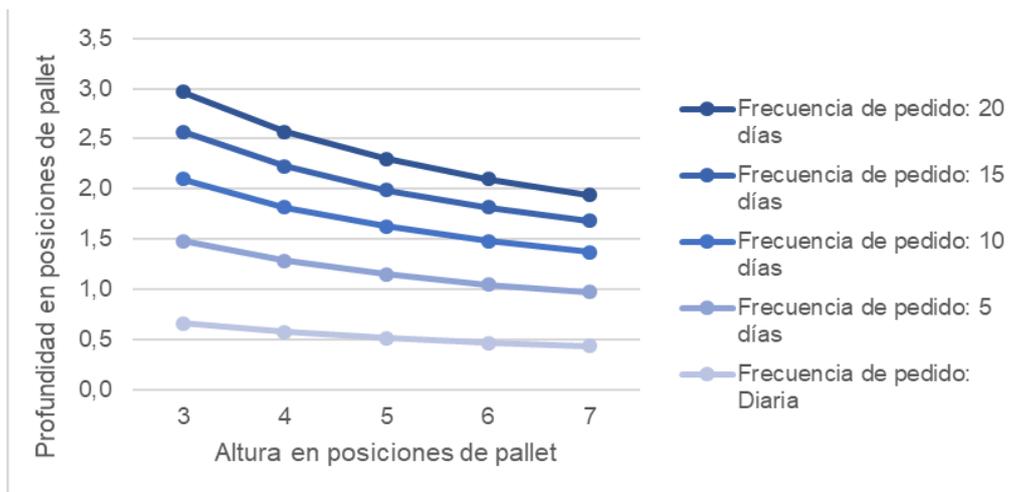


Figura 3.3: Profundidad vs altura (posiciones de pallet) – Almacén manual

Esta gráfica se realizó para el mes de Enero (representativo de los meses de mayor demanda) ya que será el mes para el que se obtendrá un requerimiento mayor de profundidad con la política de despacho de 20 días.

¹⁰ Archivo Excel en anexo electrónico: “Profundidad manual – Ecuación apilable”, pestaña: “Resumen-Ensayos manuales”.

Los resultados demuestran lo anteriormente mencionado. La profundidad óptima aumenta a medida que se aumenta la política de despacho (ya que esto aumenta los tamaños de cada orden) y al disminuir la altura.

Una observación a realizar en este análisis es que hasta este punto se aplicó la ecuación suponiendo que todos los productos tienen la misma frecuencia de pedido. Esto en la realidad de la industria no sucede así, ya que diferentes productos tendrán distintas demandas y por lo tanto distintas frecuencias de salida. Como se mencionó anteriormente, en la letra del problema, ni la frecuencia de pedido ni el tamaño de orden son dato por lo que se tiene libertad para definirlos. Dicho esto, se decidió dejar el tamaño de orden como una variable al igual que la altura. Ahora el problema reside en cómo definir esta política de despacho. A partir de este punto, se tienen dos variables con las que “jugar” con la ecuación de profundidad óptima: la altura del almacenamiento y la frecuencia de pedido, por lo que se vio conveniente intentar definir un problema de optimización para obtener la solución, ya que teniendo cinco alturas posibles y 20 políticas de despacho para cada uno de los 190 productos esto daría un total de 5×20^{190} posibles combinaciones.

El objetivo del modelo será maximizar la altura del almacenamiento dado que se pretende minimizar los costos de superficie ocupada para un almacén de una capacidad fija (6000 pallets). La razón de esto es que en Sudamérica el costo del terreno suele ser caro debido a que lo conveniente es realizar las instalaciones cerca de las grandes ciudades. Esto es, porque la mayoría de los clientes se encuentran allí y debido a que la infraestructura no se encuentra muy desarrollada es conveniente evitar viajes de largas distancias [22]. Dicho esto, y teniendo en cuenta que, si se toma como referencia el costo promedio del metro cuadrado de construcción de vivienda en comparación con la región, Montevideo es la segunda ciudad más cara [25] es que será pertinente ocupar la menor superficie posible para que la instalación sea rentable.

Para el modelado se utilizará la ecuación de profundidad óptima como restricción. El modelo al que se llegará será no lineal, dado que esta ecuación relaciona las dos variables de decisión por el cociente q_i/Z . Como consecuencia, se decidió intentar resolver el problema por medio del solver de Excel que permite la resolución de modelos no lineales.

Siendo I el conjunto de los 190 productos, FP_i la frecuencia de pedido para cada producto, H la altura en metros del almacén y recordando que K es la profundidad de almacenamiento, las restricciones del modelo serán las siguientes:

- i) Las políticas de despacho para los distintos productos estarán entre 1 y 20 días, siendo un número entero.
- ii) La profundidad de estantería debe ser mayor a 1.
- iii) La altura deberá ser mayor o igual a 3 posiciones de pallets y menor o igual a 7. Dado que se quiere lograr que el modelo obtenga la altura edilicia, las cotas sobre la altura se calcularon cuidando que respeten las alturas requeridas por los huecos de pallet más 3 metros de luz entre el final de la estantería y el techo. Vale la pena aclarar que esta distancia sufrirá cambios más adelante en el trabajo por necesidades estructurales, de normativas de seguridad e incendio. A esta altura del trabajo todavía no se habían investigado las mismas. Igualmente, como se verá más adelante los cambios no son tan drásticos por lo

que los 3 metros elegidos en principio fueron una buena aproximación.

De esta forma, el modelo queda:

Máx H

s. a.

$$1 \leq FP_i \leq 20 \quad FP_i \in \mathbb{N}, \quad \forall i \in I$$

$$8,7 \leq H \leq 16,5$$

$$K \geq 1$$

A continuación, se pasará a explicar cómo se logró aplicar el modelo en el solver de Excel de manera que maximice la altura y cumpla con las restricciones mencionadas.

Para esto, se hizo uso de las tablas previamente confeccionadas y que se brindó como ejemplo la tabla 3.1 agregándose celdas relacionadas para lograrlo. Lo desarrollado a continuación tiene el objetivo de acercar al lector un poco a como se trabaja con este solver, el cual no es una herramienta de uso habitual. A lo largo del informe habrá más modelos realizados por medio de Excel para los cuales lo descripto a continuación aplica de manera prácticamente análoga.

En primer lugar, se agregó un cuadro indicando los siguientes datos:

- i) Altura en metros (H)
- ii) Altura por pallet¹¹: muestra la altura en metros de la posición de pallet. Esto es lo que ocupa el parante de la estantería, el perfil del pallet, el bulto almacenado y la luz entre el bulto almacenado con el siguiente parante de la estantería.

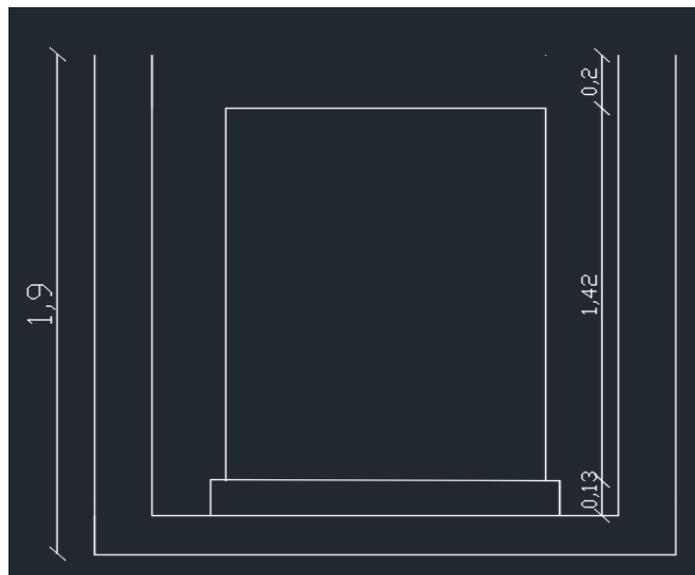


Figura 3.4: Hueco de pallet en altura

¹¹ Las medidas de pallet son el estándar de un pallet Mercosur, el resto de las medidas (gaps, parante estantería y altura de bulto) fueron aproximados en base a los depósitos visitados y a experiencia del tutor [26]

- iii) Altura en pallets: indica la altura en posiciones de pallets del almacenamiento (Z).
- iv) Área de pasillo en posiciones de pallets: indica el tamaño del pasillo medido en posiciones de pallets, para el caso manual como ya se expuso será igual a 4 posiciones de pallet, lo que sería 4,8 metros colocando el pallet de manera convencional. Esto sería, con el perfil de 1,2 metros hacia el pasillo de picking, dejando el perfil más corto (de 1 metro) en profundidad para que cuando el pallet sea retirado el centro de masa del bulto se encuentre más cerca de la carretilla dándole mayor estabilidad a la manipulación de la carga.

Además de este cuadro se agregó una celda en la cual a partir de los datos pertinentes se calcula la profundidad óptima de estantería.

A continuación, se expondrá el modelo en el lenguaje de Excel. Se mostrará una captura del mismo para ilustrarlo.

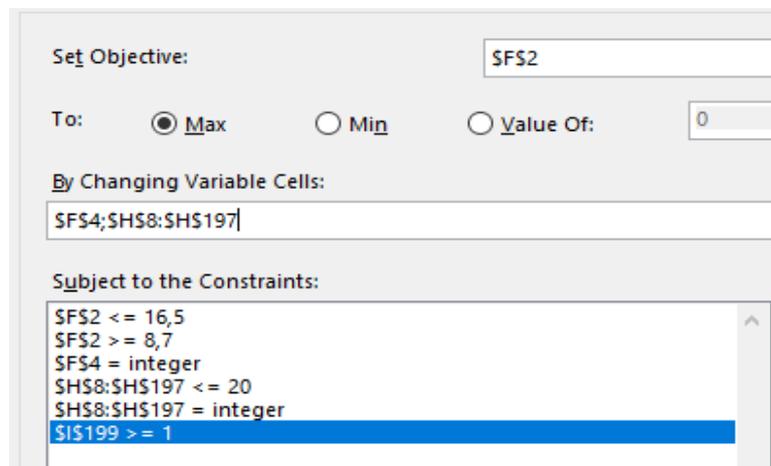


Figura 3.5: Modelo en solver de Excel – Depósito manual

Cómo se puede observar en la figura 3.5, a la derecha del texto “Set Objective” se debe colocar la función objetivo. Como se mencionó anteriormente, el objetivo del modelo será maximizar la altura del almacenamiento por lo que aquí se colocó la celda que contiene este dato en metros. En la siguiente línea del recuadro se debe seleccionar “Max” para indicar que se quiere maximizar este valor.

Luego, en el recuadro blanco debajo del texto “By Changing Variable Cells” se debe indicar las variables de decisión del modelo, por lo que aquí se colocó la celda que hace referencia a la altura en posiciones de pallets y el rango de celdas que contiene las frecuencias de pedido en días para todos los productos.

Por último, en el recuadro debajo del texto “Subject to constraints” se colocaron las restricciones del problema.

La primera y segunda línea son las cotas superiores e inferiores para la altura de la edificación. La siguiente restricción, le indica al modelo que la altura en pallets debe ser un número entero.

Las dos siguientes líneas (cuarta y quinta) están puestas sobre el rango de celdas que contiene la frecuencia del pedido en días e indica al modelo que esta frecuencia no puede superar los 20 días y debe ser un número entero.

Por último, la restricción al final del recuadro le exige al modelo que la profundidad de estantería sea mayor a 1. La celda a la que hace referencia contiene la fórmula de profundidad óptima en términos del problema.

Obtenido el modelo y escrito en Excel se comenzó a correr el mismo. Por las características del solver¹² utilizado es necesario asignar valores iniciales a las variables del modelo. Al hacer esto, se observó que las soluciones del mismo variaban dependiendo de las condiciones iniciales. A continuación, se mostrará la tabla de resultados para los meses de enero, febrero y marzo. Para el resto de los meses las distintas soluciones siguen los mismos patrones por lo que no se mostrarán en esta sección, igualmente las tablas con los resultados se encuentran en el anexo electrónico¹³.

		Enero, Febrero y Marzo									
		Corrida	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Frecuencia de pedido (días)	Valores iniciales	5 √ SKU	1 √ SKU	20 √ SKU	1 √ SKU	(*2) Ver tabla	25 √ SKU	5 √ SKU	1 √ SKU	25 √ SKU	
	Valores finales	(*1) Ver tabla	(*2) Ver tabla	20 √ SKU	(*2) Ver tabla	(*2) Ver tabla	20 √ SKU	(*1) Ver tabla	(*2) Ver tabla	20 √ SKU	
Altura (posiciones de pallets)	Valores iniciales	5	2	7	7	1	5	9	1	9	
	Valores finales	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
Altura (m)	Valores finales	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	
Profundidad (posiciones de pallet)	Valores finales	1,00	1,00	1,94	1,00	1,00	1,94	1,00	1,00	1,94	

Tabla 3.4: Resultados para distintas corridas en los meses de enero, febrero y marzo.

A continuación, se realizará el análisis de los resultados obtenidos. Según las condiciones con las que se inicializa el modelo, se distinguieron las siguientes situaciones:

- i) Si se inicia el modelo con una altura menor a la máxima, y el tamaño de las ordenes no alcanza para satisfacer la restricción sobre la profundidad, el modelo llevará la altura a la máxima y “acomodará” la frecuencia de pedido obteniendo de forma ajustada una profundidad de estantería mayor a 1. Un ejemplo de esta situación es la corrida número 2. Como se observa en la tabla 3.4, parte de una altura en pallets de 1 con una frecuencia de pedido de 2 días para todos los productos, requiriendo una profundidad de 0,81 posiciones de pallet. Al correr el modelo la frecuencia de despacho se ajusta de manera que con la máxima altura de 7 pallets llega a una profundidad de un pallet.
- ii) Si se inicia el modelo con una altura menor a la máxima, pero con una política de despacho con la que se logra satisfacer la restricción de profundidad se darán dos posibles escenarios:

¹² Solver de Excel, con la opción “GRG non linear” para la resolución de problemas no lineales. Todos los modelos que se encontrarán en el manuscrito fueron resueltos con este mismo solver.

¹³ Archivo Excel en anexo electrónico: “Profundidad manual – Ecuación apilable”, pestaña: “Resumen-Solver”.
Aclaración: Los resultados en la figura 3.9 del estilo “(*N°) Ver tabla” hacen referencia a tablas dentro del archivo Excel, ya que son casos en los que la frecuencia de pedidos varía para los distintos productos. Estas tablas de frecuencia se encuentran en la pestaña “Tablas frecuencias”. Esta aclaración vale para todas las tablas de resultados en este capítulo.

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

- a. El modelo mantendrá la política de despacho siempre que con esta logre alcanzar la altura máxima satisfaciendo la restricción de profundidad. Un ejemplo de esta situación es la corrida número 5. En esta se parte de la solución obtenida en la corrida número 2 con una altura de 1 pallet. La fórmula de profundidad óptima resulta en 2,65 posiciones de pallets. Al correr el modelo lo que se observa es que la política de despacho se mantiene constante y el modelo lleva la altura a 7, de esta forma se obtiene una profundidad de 1 pallet al igual que en la corrida número 2.
 - b. El modelo no mantiene la política de despacho y al igual que en el punto i, modifica la política de forma que consigue satisfacer la restricción de profundidad de manera ajustada con la altura máxima. Ejemplo de esta situación es la corrida número 1 en la que se parte de una frecuencia de pedido de 5 días para todos los productos y una altura de 5 posiciones de pallets obteniendo una profundidad óptima de 1,15 posiciones de pallets. Al correr el modelo como se observa en la tabla de resultados, la política de despacho cambia de manera tal que con una altura de 7 posiciones de pallets se alcanza de manera ajustada una profundidad de 1 posición de pallet. Esto es lógico que suceda ya que, si se prueba manualmente, con una política de despacho de 5 para todos los productos y con una altura de 7 posiciones de pallets se obtiene una profundidad de 0,97.
- iii) Si se inicia el modelo con la altura máxima y una política de despacho que no satisface la restricción sobre la profundidad, el solver mantendrá el valor altura y modificará la política de despacho para que cumpla la restricción mencionada de manera ajustada. Esto se puede ver en la corrida número 4 en la cual se inicializa la variable altura en 7 pallets y la frecuencia de pedido en 1, obteniendo así una profundidad óptima de 0,43. Corriendo el modelo se observa como la altura queda en 7 y la política de despacho varía de forma que la profundidad óptima es nuevamente de 1 posición de pallet.
 - iv) Por último, si se inicia el modelo con la altura máxima y una política de despacho que satisface la restricción impuesta sobre la profundidad óptima, el solver tomará esta solución como buena. Esto es lógico ya que cumple con todas las restricciones y está maximizando la altura. Un ejemplo de esta situación se puede observar en la corrida número 3 para la cual los valores iniciales y finales son los mismos con una altura de 7 posiciones de pallet, una frecuencia de pedido de 20 días para todos los productos y una profundidad de 1,94 posiciones de pallet.

Vale la pena mencionar que las corridas 6 a 9 se realizaron con el fin de explorar si ante otras combinaciones de valores iniciales se distinguían situaciones distintas a las desarrolladas previamente. Esto no fue lo que sucedió ya que para todos los casos se las pudo encasillar en alguna de las 4 situaciones, los resultados obtenidos se discuten a continuación.

Se observó que en ninguna de las corridas anteriormente se había inicializado el modelo con una política de despacho superior a la restricción de 20 días, por lo que en la corrida número 6 se partió con una política de despacho de 25 días para todos los productos y 5 posiciones de pallets de altura. Al correr el modelo se llega a una situación similar a la

i) en la que se maximiza la altura y ajusta la política de despacho a la más cercana que cumple con las restricciones, en este caso 20 días de frecuencia para todos los productos, obteniendo así una profundidad de 1,94 posiciones de pallets.

En la corrida número 7 se comprobó cómo se comportaba el modelo si se inicializaba de una altura de pallets mayor a la permitida. Se tomó como valor inicial 9 posiciones de pallets en altura y 5 días de frecuencia para todos los productos requiriéndose una profundidad de 0,857 posiciones de pallet. Al correr el modelo lo que sucede como es de esperarse, es que se reduce la altura a la máxima de 7 posiciones de pallet y como la política de despacho de 5 días no alcanza para satisfacer la restricción sobre la profundidad óptima con la máxima altura, esta se ajusta quedando igual a la solución de la corrida número 1 y siendo una situación similar al caso ii.b.

En la corrida número 8 simplemente se quiso comprobar cómo se comportaba el modelo desde los valores naturales más bajos posibles, como era de esperarse se da una situación de las mismas características que las i.

Por último, en la corrida número 9 se comprobó que sucedía sin ambas variables se inicializaban por encima de sus cotas superiores. Al hacer esto el solver simplemente ajusta la altura a la máxima y la frecuencia de pedido a la más cercana que logra cumplir con la restricción de profundidad óptima (20 días para todos los productos). Esta es una situación similar a la i, en la que en lugar de ajustarse por debajo llevando la altura a la máxima y la frecuencia de pedido de forma que, la profundidad óptima alcance uno, aquí se ajusta por arriba y disminuye tanto la altura a la cota superior (7 posiciones de pallets) como la frecuencia de pedidos (a 20 días para todos los productos) obteniendo de esta forma una profundidad en posiciones de pallet de 1,94.

Se observa como dependiendo del valor de inicialización de las variables de decisión, el problema converge a diferentes puntos. Estos representan óptimos locales y en consecuencia se está ante un problema no convexo. Por esto, lo que se deberá hacer es elegir el mejor óptimo local y asumirlo como óptimo global. Como se observó en el análisis anterior, la función objetivo en todos los casos llega al mismo valor, por lo que el conjunto de variables de decisión a elegir deberá basarse en otros criterios.

Cómo se comentó antes de comenzar el análisis, este fue explicado para los primeros 3 meses del año, pero fue analizado para todos. Al observar los resultados se puede concluir que a pesar de la variación de demanda en los distintos meses las soluciones siguen los mismos patrones, requiriendo mayor profundidad los meses de mayor demanda.

En la figura 3.6 se puede observar los resultados de la profundidad óptima para las distintas corridas. Tener en cuenta que cada número de corrida hace referencia a una combinación única de altura en pallets y frecuencia de pedido en días, siendo iguales a las mostradas en la tabla 3.4 para el primer grupo de meses.

Del gráfico en la figura 3.6 y las tablas de resultados, se observa que, bajo las distintas condiciones iniciales, para todos los meses se logra llegar a la altura máxima satisfaciendo la restricción impuesta sobre la profundidad. También se observa que para los casos en que la frecuencia de pedidos se ajusta por debajo (corridas 1, 2, 4, 5, 7 y 8) se obtiene una profundidad óptima muy cercana a 1. En los casos en que la política de despacho tiende a ajustarse por arriba (3,6,8 y 9) la profundidad óptima varía de mayor manera entre los distintos grupos de meses, pero siempre encontrándose entre 1 y 2 posiciones de pallets, por lo que esto reducirá el análisis a intentar de elegir entre estas dos profundidades.

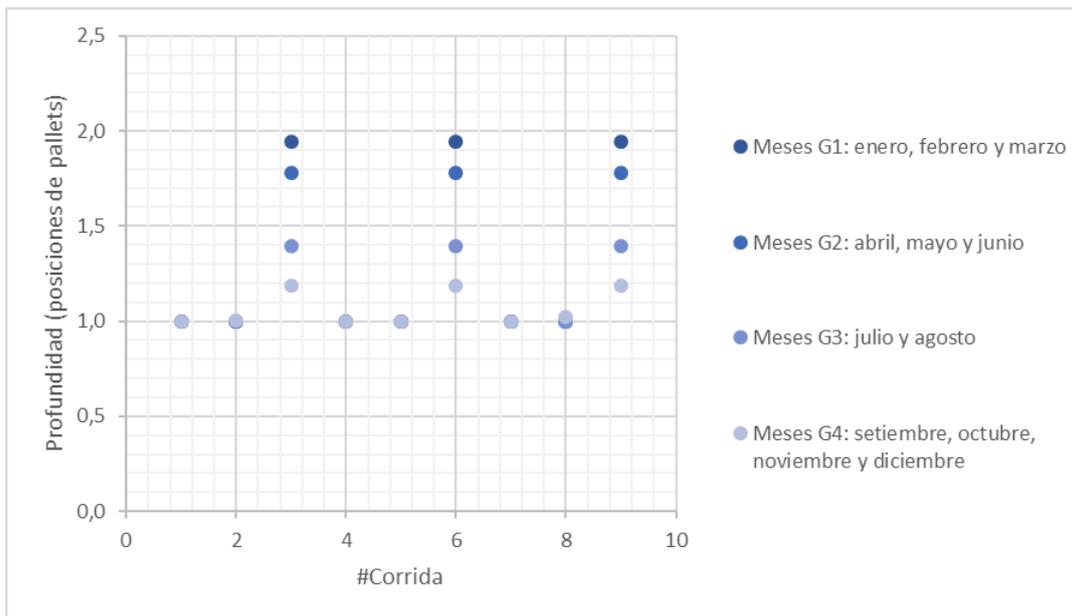


Figura 3.6: Profundidad óptima según el número de corrida para los distintos meses

Observando que para todos estos casos la altura no es una restricción (ya que se logra alcanzar la máxima posible), se vio necesario afinar el análisis sobre la frecuencia de pedidos dado que hasta esta parte del estudio lo único que se le requirió a esta variable es que fuese menor a 20 días para todos los productos.

Dicho esto, se decidió realizar un análisis ABC para acotar las frecuencias de pedido. A los productos A se les exigirá una frecuencia mayor o igual a 1 y menor o igual a 5 días; para los productos B la frecuencia deberá de ser mayor a 5 y menor o igual a 10 días; y para los C la frecuencia deberá ser mayor a 10 y menor o igual a 20 días.

El ABC fue realizado a nivel de familia de SKU por lo que a cada producto le corresponderá la categoría de su familia. También hay que aclarar que el mismo se realizó en pallets ya que para el análisis y la aplicación del modelo el flujo se midió de esta forma. Para realizar el ABC, se calculó la demanda anual de cada familia de SKUs en pallets, luego se ordenó la tabla de mayor a menor según la demanda anual y se calculó el porcentaje de la demanda que representan. Los productos A se definieron como los productos pertenecientes a la familia de SKUs que se llevan el 70% de la demanda, los productos B el siguiente 20% y los C el restante 10%. En la tabla 3.5 a se observan los resultados obtenidos.

Familia de SKU	Demanda anual (pallets)	Porción de demanda	Porción de demanda acumulada	ABC	Frecuencia de pedidos
13	4115	21%	21%	A	1 día ≤ FP ≤ 5 días
14	4115	21%	41%	A	1 día ≤ FP ≤ 5 días
15	2880	14%	56%	A	1 día ≤ FP ≤ 5 días
16	2880	14%	70%	A	1 día ≤ FP ≤ 5 días
7	880	4%	75%	B	5 días < FP ≤ 10 días
2	660	3%	78%	B	5 días < FP ≤ 10 días
3	660	3%	81%	B	5 días < FP ≤ 10 días
8	414	2%	83%	B	5 días < FP ≤ 10 días
4	385	2%	85%	B	5 días < FP ≤ 10 días
5	385	2%	87%	B	5 días < FP ≤ 10 días
6	385	2%	89%	B	5 días < FP ≤ 10 días
10	284	1%	90%	C	10 días < FP ≤ 20 días
11	284	1%	92%	C	10 días < FP ≤ 20 días
12	284	1%	93%	C	10 días < FP ≤ 20 días
17	284	1%	95%	C	10 días < FP ≤ 20 días
18	284	1%	96%	C	10 días < FP ≤ 20 días
19	284	1%	98%	C	10 días < FP ≤ 20 días
1	240	1%	99%	C	10 días < FP ≤ 20 días
9	237	1%	100%	C	10 días < FP ≤ 20 días

Tabla 3.5: Clasificación ABC por demanda en pallets

Con el ABC realizado, el siguiente paso será aplicarlo a los distintos meses para analizar los resultados. En este punto es que se abren dos opciones para continuar con el estudio. La primera es asumir que la profundidad de estantería y la altura de almacenamiento será la misma para todos los productos sin importar la categoría a la que pertenecen y de esta forma realizar un modelado en conjunto como el que se realizó anteriormente, con la diferencia de que se restringirán las políticas de despacho por categoría de producto. La segunda opción es realizar un modelado por categoría de producto, esto es, aplicarle a cada conjunto de productos (A, B y C) el modelo planteado permitiendo que cada categoría eventualmente pueda tener una profundidad y altura de estantería diferente.

Para la primera alternativa se “recicló” la tabla anteriormente utilizada para el mes de enero¹⁴. Agregando una columna que indica la categoría a la que pertenece el producto y haciendo los cambios pertinentes en el modelo, se pasó a correr el mismo. A continuación, se muestra el modelo utilizado para esta parte. Este tiene las mismas restricciones al utilizado anteriormente sobre a la altura edilicia y la profundidad de estantería. Lo que se cambió para poder reflejar las diferentes rotaciones por categoría de productos fueron las restricciones sobre la frecuencia de pedido. Siendo:

- i) A, B y C los conjuntos de los productos pertenecientes a las categorías A, B y C respectivamente.
- ii) FPY_x hará referencia a la frecuencia de pedido de cada familia de productos. Siendo Y: A, B o C y siendo x: a, b o c.
- iii) H la altura en metros de la edificación.
- iv) K la profundidad en posiciones de pallet.

¹⁴ Archivo Excel en anexo electrónico: “Profundidad manual por categorías – Ecuación apilable”

El modelo queda como se muestra a continuación:

$Máx H$

s. a.

$$1 \leq FPA_a \leq 5 \quad FPA_a \in \mathbb{N}, \quad \forall a \in A$$

$$6 \leq FPB_b \leq 10 \quad FPB_b \in \mathbb{N}, \quad \forall b \in B$$

$$11 \leq FPC_c \leq 20 \quad FPC_c \in \mathbb{N}, \quad \forall c \in C$$

$$8,7 \leq H \leq 16,5$$

$$K \geq 1$$

Obtenido el modelo, el siguiente paso fue correrlo para distintas condiciones iniciales, los resultados se muestran a continuación en la tabla 3.6¹⁵.

		Enero, Febrero y Marzo					
		Corrida	#1	#2	#3	#4	#5
Frecuencia de pedido (días)	Valores iniciales	3A, 7B, 13C	1 ∨ SKU	(*3) Ver tabla	1 ∨ SKU	5A, 10B, 20C	
	Valores finales	(*2) Ver tabla	(*3) Ver tabla	(*3) Ver tabla	(*3) Ver tabla	5A, 10B, 20C	
Altura (posiciones de pallets)	Valores iniciales	5	2	1	7	7	
	Valores finales	7	7	7	7	7	
Altura (m)	Valores finales	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	
Profundidad (posiciones de pallet)	Valores finales	1,00	1,00	1,00	1,00	1,20	

Tabla 3.6: Resultados primera alternativa del análisis por familia

Nuevamente se realizó el análisis de los resultados en función de las distintas condiciones iniciales. Se observó un comportamiento similar al detallado en el análisis general, por lo que no se expondrá como en la parte anterior. Si se quiere ver en detalle se puede consultar el anexo¹⁶.

Cómo se puede observar en la tabla 3.6, nuevamente se llega a la altura máxima (7 posiciones de pallet), obteniendo profundidades que se encuentran entre 1 y 2 posiciones de pallets. Hay que resaltar que para este caso se observa que los resultados son más cercanos a 1.

El modelo se corrió solo para los meses de mayor demanda (enero, febrero y marzo) porque se observó que para estos meses la profundidad requerida será baja (cercana a 1), por lo que analizar para los meses de menor demanda teniendo en cuenta la tendencia ya mencionada, no aportaría conclusiones distintas a ésta (la profundidad será incluso menor).

Se pasará a desarrollar la segunda alternativa del modelado por categoría de productos.

Para esta parte se confeccionaron nuevas tablas de las mismas características que las utilizadas anteriormente, con la diferencia de que habrá una tabla por categoría de

¹⁵ En esta figura, las entradas del estilo "N°A" indica que para todos los SKUs de esa categoría (A, B o C) la política de despacho es el número que precede a letra.

¹⁶ Anexo 8.1: "Ecuación depósito apilable, manual: análisis por categoría de productos general"

productos (A, B y C) para los meses estudiados¹⁷ y de esta forma un modelo para cada una de estas categorías. Estos modelos permiten que eventualmente se puedan dar distintas alturas y profundidades de almacenamiento por categoría de producto.

Con los conjuntos y variables previamente definidos, y siendo:

- i) H_x con x igual a A, B o C, la altura edilicia en metros para cada familia de productos respectivamente.
- ii) K_x con x igual a A, B o C, la profundidad de estantería en posiciones de pallet para cada familia de productos respectivamente.

El problema de optimización para los productos de la familia A queda:

Máx H_A

s. a.

$$1 \leq FPA_a \leq 5 \quad FPA_a \in \mathbb{N}, \quad \forall a \in A$$

$$8,7 \leq H_A \leq 16,5$$

$$K_A \geq 1$$

El problema de optimización para los productos de la familia B queda:

Máx H_B

s. a.

$$6 \leq FPB_b \leq 10 \quad FPB_b \in \mathbb{N}, \quad \forall b \in B$$

$$8,7 \leq H_B \leq 16,5$$

$$K_B \geq 1$$

Y por último, el problema de optimización para los productos de la familia C queda:

Máx H_C

s. a.

$$11 \leq FPC_c \leq 20 \quad FPC_c \in \mathbb{N}, \quad \forall c \in C$$

$$8,7 \leq H_C \leq 16,5$$

$$K_C \geq 1$$

¹⁷ Archivo de Excel en anexo electrónico: "Profundidad manual por categorías – Ecuación apilable", pestañas: "Enero (A)", "Enero (B)" y "Enero (C)".

Se realizará el estudio solo para los meses de enero, febrero y marzo. En la figura 3.7 a continuación, se muestran los resultados obtenidos para la familia de productos A.

Enero, Febrero y Marzo (A)							
	Corrida	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Frecuencia de pedido (días)	Valores iniciales	5 √ SKU	1 √ SKU	5 √ SKU	1 √ SKU	(*1) Ver tabla	(*5) Ver tabla
	Valores finales	5 √ SKU	(*1) Ver tabla	5 √ SKU	(*1) Ver tabla	(*1) Ver tabla	(*4) Ver tabla
Altura (posiciones de pallets)	Valores iniciales	3	2	7	7	1	6
	Valores finales	7	7	7	7	7	7
Altura (m)	Valores finales	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3	16,3
Profundidad (posiciones de pallet)	Valores finales	1,77	1,00	1,77	1,00	1,00	1,01

Tabla 3.7: Resultados para enero, febrero y marzo – Productos A (Segunda alternativa)

El análisis detallado de las soluciones se encuentra en el anexo¹⁸.

Tomando solo los productos pertenecientes a la categoría A, las profundidades óptimas queriendo maximizar la altura oscilan nuevamente entre 1 y 2 posiciones de pallets. En este caso también se logra obtener la máxima altura (7 posiciones de pallets), tendiendo la profundidad óptima a ser más cercana a 1 a que a 2.

Lo siguiente a realizar, fue aplicar el modelo a los productos de la categoría B. Los resultados se muestran en la figura 3.8 a continuación.

Enero, Febrero y Marzo (B)						
	Corrida	#1	#2	#3	#4	#5
Frecuencia de pedido (días)	Valores iniciales	1	7 √ SKU	9 √ SKU	6 √ SKU	15 √ SKU
	Valores finales		10 √ SKU	10 √ SKU	10 √ SKU	10 √ SKU
Altura (posiciones de pallets)	Valores iniciales	2	5	5	2	7
	Valores finales		6	6	6	6
Altura (m)	Valores finales		14,4	14,4	14,4	14,4
Profundidad (posiciones de pallet)	Valores finales		1,08	1,08	1,08	1,08

Tabla 3.8: Resultados para enero, febrero y marzo – Productos B (Segunda alternativa)

Con los productos de esta categoría se da un caso particular. Si se inicializa el modelo con una frecuencia de pedido de 1 día para todos los productos y con una altura de 2 pallets, el solver no es capaz de hallar una solución factible, por lo que da error. Esto llamó la atención por lo que se comenzó a mirar con mayor detenimiento este caso. Realizando una prueba de forma manual en la que se colocó la máxima altura (7 posiciones de pallets) y una política de despacho de 10 días para todos los productos el modelo no logra satisfacer la restricción de profundidad óptima ya que resulta en 0,99 posiciones de pallet, por esto, para esta familia de productos se puede asegurar que nunca se alcanzará la máxima altura de almacenamiento.

El análisis de las distintas soluciones se puede ver en detalle en el anexo del trabajo¹⁹.

En las soluciones, se observa como para esta categoría de productos la altura máxima alcanzada es de 5 posiciones de pallets, con una profundidad óptima para minimizar los desperdicios muy cercana a 1 posición de pallet. También es pertinente destacar que estos resultados se logran con los mayores tamaños de ordenes posibles para esta

¹⁸ Anexo 8.1: "Ecuación depósito apilable, manual: análisis por categoría (A)".

¹⁹ Anexo 8.1: "Ecuación depósito apilable, manual: análisis por categoría (B)".

familia de productos, ya que para todas las soluciones la política de despacho es igual a la máxima para este caso (10 días).

Por último, se aplicó el modelo a los productos clasificados como C. Los resultados se muestran a continuación en la tabla 3.9.

		Enero, Febrero y Marzo (C)		
		Corrida	#1	#2
Frecuencia de orden (días)	Valores iniciales	14 √ SKU	10 √ SKU	20 √ SKU
	Valores finales	14 √ SKU	11 √ SKU	20 √ SKU
Altura (huecos de pallets)	Valores iniciales	4	7	7
	Valores finales	7	7	7
Altura (m)	Valores finales	16,3	16,3	16,3
Profundidad (posiciones de pallet)	Valores finales	1,17	1,04	1,40

Tabla 3.9: Resultados para enero, febrero y marzo – Productos C (Segunda alternativa)

Cómo se puede observar este análisis²⁰ por familias proporciona similares a lo que ya se venía observando con los análisis anteriores, en particular se puede decir que es similar a lo que sucede con los productos de la categoría A, ya que se logra llegar a la máxima altura (7 posiciones de pallets) con profundidades óptimas muy cercanas a 1.

3.2.2.2 Depósito Automático

El estudio para el depósito automático fue de similares características al realizado para el manual. Un cambio a remarcar es que para este caso se toma como ancho de pasillo 1,5 posiciones de pallets, ya que se tomó como referencia el pasillo del transelevador y se decidió que este tamaño era representativo.

Para esta parte se utilizaron las mismas tablas de demanda que para la parte anterior (ya que el caso de estudio será el mismo).

Al igual que para el caso manual, se comenzó por observar cómo se comporta la ecuación de profundidad variado las alturas en el rango definido para este tipo de depósito. La altura mínima se tomó de 8 posiciones de pallet ya que la cota máxima para el modelo manual fue de 7. Para la altura máxima se tomó 23 posiciones de pallet (lo que equivale a 41.8 metros) debido a que la máxima altura de trabajo del transelevador automático tomado como referencia [27] fue de 45 metros. Al igual que en el estudio realizado para el depósito manual, se comenzó probando la ecuación con una frecuencia de pedido diaria para todos los productos²¹. Los resultados se muestran en la tabla 3.10. Vale la pena aclarar que los meses pintados con los mismos colores

²⁰ Si se quiere ver un análisis de las soluciones en mayor detalle, consultar el anexo 8.1: "Ecuación depósito apilable, manual: análisis por categoría (C)"

²¹ Anexo electrónico: "Profundidad automático – Ecuación apilable."

representan meses de igual demanda, siendo el grupo de meses que incluye a enero el de mayor volumen.

		Altura (posiciones de pallets)															
		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
M e s	Enero	0,249	0,235	0,223	0,212	0,203	0,195	0,188	0,182	0,176	0,171	0,166	0,161	0,157	0,154	0,150	0,147
	Febrero	0,249	0,235	0,223	0,212	0,203	0,195	0,188	0,182	0,176	0,171	0,166	0,161	0,157	0,154	0,150	0,147
	Marzo	0,249	0,235	0,223	0,212	0,203	0,195	0,188	0,182	0,176	0,171	0,166	0,161	0,157	0,154	0,150	0,147
	Abril	0,228	0,215	0,204	0,194	0,186	0,179	0,172	0,166	0,161	0,156	0,152	0,148	0,144	0,141	0,137	0,134
	Mayo	0,228	0,215	0,204	0,194	0,186	0,179	0,172	0,166	0,161	0,156	0,152	0,148	0,144	0,141	0,137	0,134
	Junio	0,228	0,215	0,204	0,194	0,186	0,179	0,172	0,166	0,161	0,156	0,152	0,148	0,144	0,141	0,137	0,134
	Julio	0,178	0,168	0,160	0,152	0,146	0,140	0,135	0,130	0,126	0,122	0,119	0,116	0,113	0,110	0,108	0,105
	Agosto	0,178	0,168	0,160	0,152	0,146	0,140	0,135	0,130	0,126	0,122	0,119	0,116	0,113	0,110	0,108	0,105
	Septiembre	0,152	0,143	0,136	0,130	0,124	0,119	0,115	0,111	0,107	0,104	0,101	0,099	0,096	0,094	0,092	0,090
	Octubre	0,152	0,143	0,136	0,130	0,124	0,119	0,115	0,111	0,107	0,104	0,101	0,099	0,096	0,094	0,092	0,090
	Noviembre	0,152	0,143	0,136	0,130	0,124	0,119	0,115	0,111	0,107	0,104	0,101	0,099	0,096	0,094	0,092	0,090
	Diciembre	0,152	0,143	0,136	0,130	0,124	0,119	0,115	0,111	0,107	0,104	0,101	0,099	0,096	0,094	0,092	0,090

Tabla 3.10: Profundidad óptima con política de despacho diaria para deposito automático

Análogo al caso manual, para los meses de mayor demanda y a menores alturas de almacenamiento, la profundidad óptima será mayor. Cabe destacar que, para esta política de despacho, con ninguna altura, la profundidad de almacenamiento óptima requerida será mayor a uno. Observado esto se probó con el caso en el opuesto extremo, que la política de despacho de todos los productos sea de 20 días. Los resultados se muestran en la tabla 3.11.

		Altura (posiciones de pallets)															
		8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
M e s	Enero	1,11	1,05	0,995	0,949	0,909	0,873	0,841	0,813	0,787	0,763	0,742	0,722	0,704	0,687	0,671	0,656
	Febrero	1,11	1,05	0,995	0,949	0,909	0,873	0,841	0,813	0,787	0,763	0,742	0,722	0,704	0,687	0,671	0,656
	Marzo	1,11	1,05	0,995	0,949	0,909	0,873	0,841	0,813	0,787	0,763	0,742	0,722	0,704	0,687	0,671	0,656
	Abril	1,02	0,960	0,911	0,868	0,831	0,799	0,770	0,743	0,720	0,698	0,679	0,661	0,644	0,628	0,614	0,600
	Mayo	1,02	0,960	0,911	0,868	0,831	0,799	0,770	0,743	0,720	0,698	0,679	0,661	0,644	0,628	0,614	0,600
	Junio	1,02	0,960	0,911	0,868	0,831	0,799	0,770	0,743	0,720	0,698	0,679	0,661	0,644	0,628	0,614	0,600
	Julio	0,798	0,752	0,714	0,680	0,652	0,626	0,603	0,583	0,564	0,547	0,532	0,518	0,505	0,492	0,481	0,471
	Agosto	0,798	0,752	0,714	0,680	0,652	0,626	0,603	0,583	0,564	0,547	0,532	0,518	0,505	0,492	0,481	0,471
	Septiembre	0,679	0,640	0,607	0,579	0,554	0,533	0,513	0,496	0,480	0,466	0,453	0,441	0,430	0,419	0,410	0,401
	Octubre	0,679	0,640	0,607	0,579	0,554	0,533	0,513	0,496	0,480	0,466	0,453	0,441	0,430	0,419	0,410	0,401
	Noviembre	0,679	0,640	0,607	0,579	0,554	0,533	0,513	0,496	0,480	0,466	0,453	0,441	0,430	0,419	0,410	0,401
	Diciembre	0,679	0,640	0,607	0,579	0,554	0,533	0,513	0,496	0,480	0,466	0,453	0,441	0,430	0,419	0,410	0,401

Tabla 3.11: Profundidad óptima con política de despacho 20 días para deposito automático

Como se esperaba, al aumentar los días de la política de despacho y en consecuencia, los tamaños de orden, la profundidad de almacenamiento requerida para minimizar el desperdicio aumenta, pero se puede observar que para un reducido número de opciones la misma es mayor a 1.

Para los meses de mayor demanda se logra con una altura máxima de 9 posiciones de pallets y para abril, mayo y junio con 8 posiciones de pallet. En la figura 3.7 se muestra un gráfico en el que se compara según la altura, la profundidad de estantería requerida para minimizar el desperdicio para las dos políticas de despacho mencionadas anteriormente, para el mes de enero. Se utilizó este mes nuevamente como referencia.

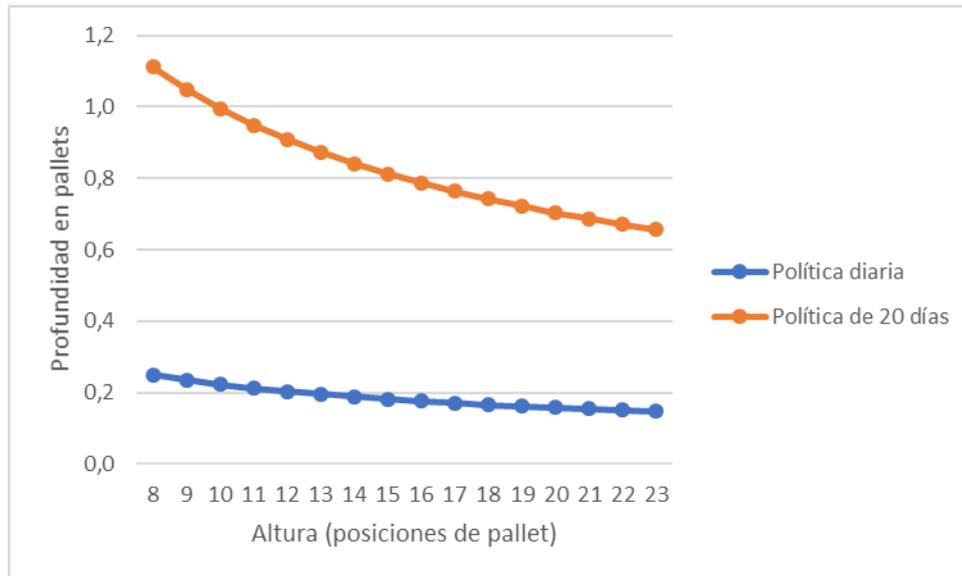


Figura 3.7: Profundidad vs altura- modelo automático (enero)

Se puede ver que la profundidad requerida no supera por mucho a una posición de pallet. Igualmente, con el fin de observar cómo se comporta el modelado en esta situación se planteó el problema con el mismo objetivo que el realizado para el caso del depósito manual: obtener una política de despacho de forma de maximizar la altura edilicia con el objetivo de reducir la inversión en superficie. En el caso del depósito automático el buscar obtener una gran altura responde también a que, cuando se trabaja con los transelevadores automáticos es más eficiente hacerlo con grandes distancias porque el mayor gasto de energía se da en los arranques y paradas de la maquinaria, por lo que permitirle desplazarse en una misma dirección por un periodo mayor de tiempo significará un ahorro energético [22].

Al igual que para el depósito manual, en el primer modelado planteado para este caso se le pide al modelo que maximice la altura edilicia respetando las cotas, con política de despacho entre 1 y 20 días para todos sus productos y exigiendo que la profundidad óptima sea mayor a 1.

Teniendo en cuenta las variables y conjuntos definidos previamente, el modelado quedará como se muestra a continuación:

Máx H

s. a.

$$1 \leq FP_i \leq 20 \quad FP_i \in \mathbb{N}, \quad \forall i \in I$$

$$18,2 \leq H \leq 46,7$$

$$K \geq 1$$

Debajo en la tabla 3.12 se pueden ver los resultados obtenidos al correr el modelo para los meses de mayor demanda.

		Enero, Febrero y Marzo				
		Corrida	#1	#2	#3	#4
Frecuencia de pedido (días)	Valores iniciales	5 √ SKU	20 √ SKU	18 √ SKU	19 √ SKU	
	Valores finales	(*1)Ver tabla	20 √ SKU	20 √ SKU	20 √ SKU	
Altura (posiciones de pallets)	Valores iniciales	18	8	8	9	
	Valores finales	9	9	9	9	
Altura (m)	Valores finales	20,1	20,1	20,1	20,1	
Profundidad (posiciones de pallet)	Valores finales	1,00	1,05	1,05	1,05	

Tabla 3.12: Profundidad óptima para depósito automático (enero, febrero y marzo)

Una vez más inicializando las variables en distintos valores se pueden observar distintos resultados. Se observó que el comportamiento del modelo es similar al caso manual, pero se obtendrán distintos resultados numéricos. El detalle de este análisis se puede encontrar en el anexo²².

En concordancia con el análisis manual previamente realizado, se obtuvo una altura máxima de 9 pallets para este grupo de meses.

Luego de analizar los meses de mayor demanda se pasó a estudiar que sucedía con el siguiente grupo de meses (abril, mayo y junio). En la tabla 3.13 se pueden ver los resultados obtenidos. Vale la pena aclarar que este grupo de meses se lo miró con mayor detenimiento para el depósito automático debido a que como se puede ver en la tabla 3.13 el modelo será capaz de hallar una solución factible, pero a menores alturas. Dicho esto, las corridas del modelo para los meses restantes no se realizaron ya que, observando el mismo gráfico, es trivial que bajo esas condiciones el modelo no encontrará una solución.

		Abril, Mayo y Junio			
		Corrida	#1	#2	#3
Frecuencia de pedido (días)	Valores iniciales	5 √ SKU	20 √ SKU	20 √ SKU	
	Valores finales	(*2)Ver tabla	20 √ SKU	20 √ SKU	
Altura (posiciones de pallets)	Valores iniciales	18	8	7	
	Valores finales	8	8	8	
Altura (m)	Valores finales	18,2	18,2	18,2	
Profundidad (posiciones de pallet)	Valores finales	1,00	1,02	1,02	

Tabla 3.13: Profundidad óptima para depósito automático (abril, mayo y junio)

Nuevamente se variaron las condiciones iniciales para observar el comportamiento del modelo. Las situaciones serán análogas a las anteriormente desarrolladas y el detalle se encuentra en el anexo²³.

²² Anexo 8.1: "Ecuación depósito apilable, automático: análisis por categoría de productos general (enero, febrero y marzo)"

²³ Anexo 8.1: "Ecuación depósito apilable, automático: análisis por categoría de productos general (abril, mayo y junio)"

Para este conjunto de meses la altura máxima alcanzada es 8 posiciones de pallets. Otra observación pertinente es que para ambos casos el lograr cumplir con las restricciones maximizando la altura significa tener ordenes de gran tamaño.

Ahora corresponde realizar el análisis por categoría de producto²⁴. Para el depósito automático con alturas muy cercanas a la mínima (8 y 9 posiciones de pallets) se le exigía a la frecuencia de pedido de los productos A que fuese de 20 días. Por esto se sospechó que para la primera alternativa del análisis por familias²⁵ el modelo no obtendría bajo ninguna condición una solución factible. Dicho esto, se decidió comprobar qué resultado de profundidad óptima se obtendría bajo las condiciones más favorables. Esto sería, en los meses de mayor demanda, la menor altura (8 posiciones de pallet) y las ordenes de mayor tamaño (las cuales se obtienen con una política de despacho de 5, 10 y 20 días para los productos A, B y C respectivamente). El resultado con estos valores es de una profundidad óptima de 0,69 posiciones de pallet, por lo que la primera alternativa del análisis por familias para este depósito no tiene sentido realizarla.

Para la segunda alternativa²⁶ del análisis por categoría de productos pasa algo similar a la situación explicada anteriormente. Para los productos B y C tomando la situación en la que se exigiría mayor profundidad de estantería, siendo esto la menor altura posible de almacenamiento (8 posiciones de pallets) y las políticas de despacho con las que se obtiene el mayor tamaño de orden (10 días para los productos de la categoría B y 20 para los de la C) la profundidad requerida será 0,57 para los productos B y 0,86 para los C. Por lo que correr el modelo no tiene sentido ya que el mismo sería no factible.

Para el caso de los productos pertenecientes a la categoría A²⁷ se comprobó también el caso favorable y se observó que con el mayor tamaño de orden (política de despacho igual a 5 días) y la mínima altura se obtenía una solución factible para el modelo, por lo que para esta familia de productos se realizó el estudio correspondiente. Utilizando los conjuntos y las variables definidas previamente, el modelo utilizado queda como se muestra a continuación:

$$\text{Máx } H_A$$

s. a.

$$1 \leq FPA_a \leq 5 \quad FPA_a \in \mathbb{N}, \quad \forall a \in A$$

$$18,2 \leq H_A \leq 46,7$$

$$K_A \geq 1$$

²⁴ Anexo electrónico: "Profundidad automático por categorías – Ecuación apilable."

²⁵ Se recuerda que en esta alternativa se aplica el modelo a todo el conjunto de productos y de esta forma todos tendrán la misma altura y profundidad de estantería.

²⁶ Se recuerda que en este análisis por cómo se aplica, permite que, eventualmente cada familia de productos tenga una profundidad y altura de almacenamiento diferente.

²⁷ Vale la pena aclarar que cuando se realiza el estudio por familias siempre se está hablando para los meses de mayor demanda por los justificado anteriormente.

Una vez más, se inicializo el modelo con distintos valores para las variables de decisión con el fin de analizar las soluciones, los resultados se muestran en la tabla 3.14 a continuación:

		Enero, Febrero y Marzo (A)			
		Corrida	#1	#2	#3
Frecuencia de pedido (días)	Valores iniciales	5 √ SKU	1 √ SKU	(*1)Ver tabla	
	Valores finales	5 √ SKU	5 √ SKU	5 √ SKU	
Altura (posiciones de pallets)	Valores iniciales	3	2	8	
	Valores finales	8	8	8	
Altura (m)	Valores finales	18,2	18,2	18,2	
Profundidad (posiciones de pallet)	Valores finales	1,01	1,01	1,01	

Tabla 3.14: Resultados para modelo Excel, depósito automático – Productos A

Observando los resultados se puede decir que para las condiciones del problema y si se quiere satisfacer la restricción impuesta sobre la profundidad, la altura máxima para esta familia de productos será de 8 posiciones de pallets. Lo que ocurre al correr el modelo es similar a lo descrito para análisis anteriores, si se quiere ver el análisis de las soluciones en mayor detalle se consultar el anexo²⁸.

Aquí se dará por finalizado el análisis para el caso en que se aplicó la ecuación encontrada durante la investigación bibliográfica, la cual fue deducida para depósitos apilables. A continuación, se pasará a detallar la deducción de una ecuación para depósitos con racks selectivos, inspirada en la anterior.

3.2.3 Profundidad de estantería: Depósito racks

En esta sección se deducirá una ecuación para hallar la profundidad de estantería para el caso de almacenamiento en racks selectivos. Vale la pena mencionar que todos los parámetros que aparecen en la deducción a continuación fueron definidos previamente en la sección 3.1.1 del manuscrito.

Siguiendo la línea de la deducción anterior, se empezará por hallar el termino de desperdicio por honeycombing. Para el caso de racks, el honeycombing se da por línea de picking y no por plano de almacenamiento, dado que un pallet en una posición superior a otro no impide que se acceda a él. Por esto, cada línea de almacenamiento tendrá una posición de pallet libre pero no disponible en intervalos de $1/D_i, 2/D_i, \dots, (K-1)/D_i$. Sacando de factor común $1/D_i$ y utilizando la fórmula de Gauss para la suma de números consecutivos del 1 a $(K-1)$ se obtiene un desperdicio de $K(K-1)/(2D_i)$ posiciones de pallets-año por línea de almacenamiento. Siendo el número de frentes de picking q_i/K y multiplicándolo por el desperdicio por frente, se obtiene una aproximación del desperdicio total en un ciclo de orden:

$$DH = \left(\frac{K-1}{2}\right) * \left(\frac{q_i}{D_i}\right) \text{ posiciones de pallet por año}$$

Como se observa, este término queda igual a la deducción realizada para el caso de cargas apilables.

²⁸ Anexo 8.1: "Ecuación depósito apilable, automático: análisis por categoría de productos general (A)"

Para el espacio desperdiciado de pasillo se estudiaron dos posibilidades ya que este dependerá de la forma en que se extraigan los pallets.

La primera opción manejada es que se extraigan las cargas como si fuera apilable. De esta forma el término de desperdicio quedaría igual al caso apilable y como se vio anteriormente, el término de honeycombing queda igual por lo que la fórmula de profundidad óptima sería la misma que para el caso apilable.

La segunda opción manejada sería considerar que se realiza la extracción de los pallets a nivel de piso en primera instancia para luego pasar a los de niveles superiores. La primera línea de almacenamiento se libera después de que K pallets salen, la segunda luego de $2K$ y así para todas las profundidades a nivel de piso. A cada una de estas líneas de almacenamiento se las penaliza con un espacio de pasillo desperdiciado de $a/2$ y siendo el número de líneas de almacenamiento iguales a las cantidades de planos de almacenamiento necesarios ($q_i/(Z_i \cdot K)$), aplicando la fórmula de Gauss y multiplicando por el espacio de pasillo que requiere cada frente de picking ($a/2$) el desperdicio de pasillo ocupado en un ciclo de orden queda:

$$DP = \frac{K \left(\frac{q_i}{Z_i K} + 1 \right) \frac{q_i}{Z_i K}}{2} * \frac{a}{2D_i}$$

Luego, como en la deducción anterior, se suman ambos términos de desperdicio y se divide por un ciclo de orden:

$$dt = \frac{K - 1}{2} + \left(\frac{q_i}{Z_i K} + 1 \right) \frac{a}{4Z_i}$$

Derivando con respecto de K se puede hallar la profundidad que minimiza el desperdicio total:

$$K = \frac{1}{Z_i} \sqrt{\frac{a q_i}{2}}$$

Análogamente a la deducción anterior, se plantea lo poco práctico de permitir una profundidad distinta para cada producto por lo que siendo n el número de productos, suponiendo la misma altura de almacenamiento para todos estos y realizando los cálculos necesarios se obtiene que la profundidad óptima de estantería para depósitos con racks selectivos está dada por la siguiente expresión:

$$K = \frac{1}{Z} \sqrt{\frac{a}{2n} \sum q_i}$$

Recordando la ecuación deducida para depósitos apilables se puede observar rápidamente como para una misma altura, mismos tamaños de orden, mismo pasillo y misma cantidad de productos la profundidad requerida para minimizar el desperdicio será menor, ya que el único término que cambia es la altura la cual queda por fuera de la raíz. Esto hace que, al aumentar, la profundidad requerida para generar menores desperdicios sea menor.

$$K = \sqrt{\frac{a}{2} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{z_i}}$$

Esto es lógico, ya que para la deducción de la ecuación se plantea que, almacenando en racks, una vez liberado el pasillo del frente de picking a nivel de piso este se le podrá asignar a otro producto en lugar de tener que esperar a que se vacíe toda la columna como se suponía en la deducción anterior. Para ilustrar esto, se graficó para los meses de mayor demanda, tanto para el caso manual como automático la profundidad en función de la altura para las frecuencias de pedidos extremos (1 y 20 días). Esto se muestra en las figuras 3.8 y 3.9.

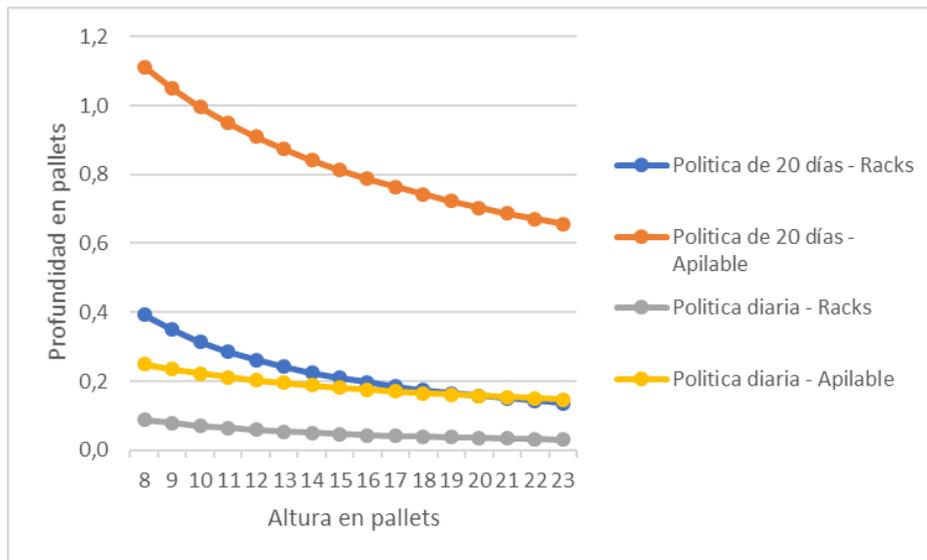


Figura 3.8: Comparación de resultados para fórmula para depósito apilable vs racks (automático)

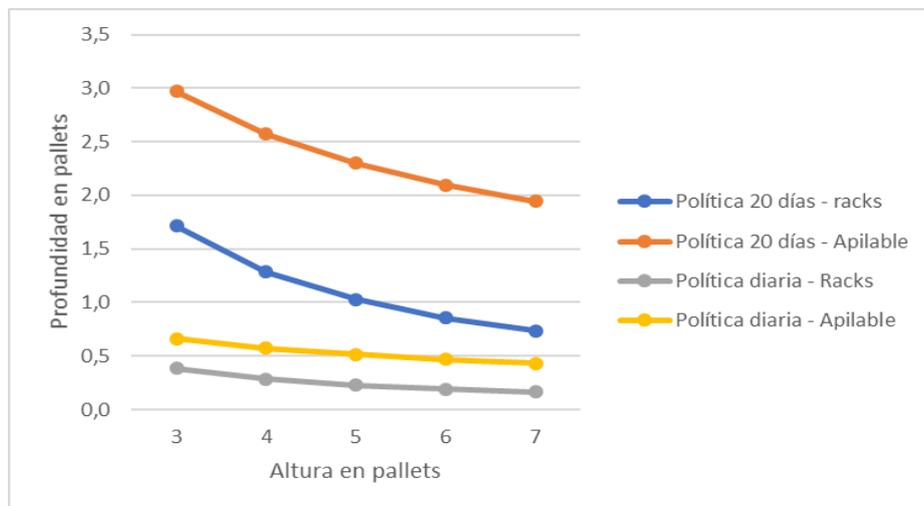


Figura 3.9: Comparación de resultados para fórmula para depósito apilable vs racks (manual)

Para una misma política de despacho y una misma altura, los valores de profundidad óptima requeridos serán menores para la fórmula del almacenamiento en racks. La diferencia se ve marcada sobre todo si se observa la política de 20 días. Mientras que para la mínima altura en el caso del depósito apilable la profundidad óptima requerida es de 1,11, para la ecuación de almacenamiento en racks es de 0,39. Por esta razón es que no se ahondará más en el estudio para el depósito automático con la ecuación deducida, ya que bajo las condiciones del problema nunca se alcanzará ni siquiera 1 posición de pallet en profundidad.

Para el caso de los depósitos manuales como se observa en la figura 3.9, los resultados son menos concluyentes. Se sigue observando la tendencia previamente descrita, en la que para una misma política de despacho y altura de almacenamiento las profundidades requeridas serán menores para el caso del depósito con racks. En la tabla 3.15 se pueden observar los resultados obtenidos.

		Altura (posiciones de pallets)				
		3	4	5	6	7
M e s	Enero	1,71	1,28	1,03	0,857	0,734
	Febrero	1,71	1,28	1,03	0,857	0,734
	Marzo	1,71	1,28	1,03	0,857	0,734
	Abril	1,57	1,18	0,940	0,784	0,672
	Mayo	1,57	1,18	0,940	0,784	0,672
	Junio	1,57	1,18	0,940	0,784	0,672
	Julio	1,23	0,921	0,737	0,614	0,526
	Agosto	1,23	0,921	0,737	0,614	0,526
	Septiembre	1,05	0,784	0,627	0,523	0,448
	Octubre	1,05	0,784	0,627	0,523	0,448
	Noviembre	1,05	0,784	0,627	0,523	0,448
	Diciembre	1,05	0,784	0,627	0,523	0,448

Tabla 3.15: Resultados para política de despacho mensual, depósito manual – fórmula racks

Para las corridas del modelo realizadas para los meses de mayor demanda, con el objetivo de maximizar la altura se logrará obtener una altura de 5 posiciones de pallets. Para los meses del segundo grupo una altura de 4 posiciones de pallets y para los últimos dos grupos de meses se obtendrá como altura máxima, la mínima exigida para este tipo de almacenamiento, 3 posiciones de pallets.

El modelo utilizado se muestra a continuación²⁹, el mismo es igual al utilizado para el primer estudio realizado sobre la ecuación para almacenamiento apilable, con la diferencia de que la fórmula de profundidad óptima será la hallada anteriormente en esta sección. Se recuerda que K es la profundidad de estantería en posiciones de pallet, H es la altura edilicia, I el conjunto de productos y FP_i la frecuencia de pedidos para los distintos productos.

Máx H

s. a.

$$1 \leq FP_i \leq 20 \quad FP_i \in \mathbb{N}, \quad \forall i \in I$$

$$K \geq 1$$

$$8,7 \leq H \leq 16,5$$

²⁹ Anexo electrónico: "Profundidad manual – Ecuación racks"

Los resultados tras correr el modelo se observan en la tabla 3.16 a continuación.

		Enero, Febrero y Marzo			
		Corrida	#1	#2	#3
Frecuencia de pedido (días)	Valores iniciales	1 √ SKU	1 √ SKU	(*1) Ver tabla	
	Valores finales	20 √ SKU	20 √ SKU	20 √ SKU	
Altura (posiciones de pallets)	Valores iniciales	2	1	5	
	Valores finales	5	5	5	
Altura (m)	Valores finales	12,5	12,5	12,5	
Profundidad (posiciones de pallet)	Valores finales	1,03	1,03	1,03	

Tabla 3.16: Resultados modelo Excel deposito manual aplicado a meses de mayor demanda – Formula Racks

Se observa un comportamiento similar al descrito en partes anteriores. Si se quiere ver el análisis de las soluciones se puede consultar el anexo³⁰.

Como se había adelantado se obtiene una altura máxima de 5 posiciones de pallets, resaltando que esta se alcanza para todas las soluciones exploradas con la política de despacho de 20 días y, por ende, el mayor tamaño de orden posible.

Los grupos de meses restantes se comportan de manera similar, con la diferencia de que para los meses de abril, mayo y junio se alcanza una altura máxima de 4 pallets mientras que para el resto de los grupos de meses se obtiene una altura de 3, como se esperaba por los resultados observados en la tabla 3.15. Al igual que para el conjunto de meses de mayor demanda, estas alturas se alcanzan con los mayores tamaños de orden. Los resultados para las corridas realizadas para estos casos se pueden observar en la tabla 3.17 a continuación.

		Abril, Mayo y Junio			Julio y Agosto			Setiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre			
		Corrida	#1	#2	#3	#1	#2	#3	#1	#2	#3
Frecuencia de pedido (días)	Valores iniciales	1 √ SKU	1 √ SKU	15 √ SKU	1 √ SKU	1 √ SKU	14 √ SKU	1 √ SKU	1 √ SKU	19 √ SKU	
	Valores finales	20 √ SKU	20 √ SKU	20 √ SKU	20 √ SKU	20 √ SKU	20 √ SKU	20 √ SKU	20 √ SKU	20 √ SKU	
Altura (posiciones de pallets)	Valores iniciales	2	1	4	2	1	3	2	1	3	
	Valores finales	4	4	4	3	3	3	3	3	3	
Altura (m)	Valores finales	10,6	10,6	10,6	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	8,7	
Profundidad (posiciones de pallet)	Valores finales	1,18	1,18	1,18	1,23	1,23	1,23	1,00	1,05	1,05	

Tabla 3.17: Resultados para modelo Excel deposito manual – Formula racks

En este punto, correspondería realizar el análisis por categoría de productos³¹. Pero se observó que para los productos B y C el modelo no cumplirá nunca con la restricción de profundidad para el rango de las alturas permitidas, mientras que para el caso de los productos A lo hará alcanzando la altura máxima de 4 posiciones de pallets. Los resultados para esta categoría se muestran a en la tabla 3.18.

³⁰ Anexo 8.1: "Ecuación depósito racks, manual: análisis general."

³¹ Anexo electrónico: "Profundidad manual por categorías – Ecuación racks"

		Enero, febrero y marzo			
		Corrida	#1	#2	#3
Frecuencia de pedido (días)	Valores iniciales	2 √ SKU	1 √ SKU	4 √ SKU	
	Valores finales	5 √ SKU	5 √ SKU	5 √ SKU	
Altura (posiciones de pallets)	Valores iniciales	4	2	4	
	Valores finales	4	4	4	
Altura (m)	Valores finales	10,6	10,6	10,6	
Profundidad (posiciones de pallet)	Valores finales	1,17	1,17	1,17	

Tabla 3.18: Resultados para deposito manual (familia A)-
Formula racks

Los resultados aplicando la ecuación de esta sección son similares a los obtenidos al aplicar la ecuación para el caso apilable. En la figura a continuación se puede observar un resumen de los resultados de altura y profundidad para ambas ecuaciones (almacenamiento apilable y racks selectivos) para todos los casos estudiados.

		Ecuación aplicada a almacenamiento apilable		Ecuación aplicada a almacenamiento en racks
		Manual	Automático	Manual
Análisis general	K	Entre 1 y 2	Tiende a 1	Tiende a 1
	Z	7	9	5
Análisis por categoría (general)	K	Tiende a 1		
	Z	7		
Análisis por categoría (A)	K	Entre 1 y 2	Tiende a 1	Tiende a 1
	Z	7	8	4
Análisis por categoría (B)	K	Tiende a 1		
	Z	5		
Análisis por categoría (C)	K	Tiende a 1		
	Z	7		

Tabla 3.19: Resumen resultados de profundidad óptima

Observando los resultados se puede decir para ambos tipos de depósitos (manuales y automáticos) la profundidad óptima requerida para minimizar el desperdicio será baja, llegando a la altura máxima para los almacenes manuales y apenas sobrepasando la mínima en los automáticos

3.2.4 Conclusiones con respecto a la profundidad

Lo primero a destacar es que ambas formulaciones estudiadas en este capítulo dependerán estrechamente de dos factores: la altura de almacenamiento y el tamaño de orden. Cuanto más grande sea la altura, menor será la profundidad requerida para minimizar el desperdicio y cuanto mayor sea los tamaños de orden, mayor será la profundidad requerida.

Con respecto a la aplicación de la fórmula para almacenamientos apilables al caso del depósito manual, se observó que con la misma para las diferentes alturas posibles se requería desde una profundidad de 1 a 3 posiciones de pallets como máximo. Al aplicarle el modelo, se logra alcanzar la altura máxima para este caso de 7 pallets,

requiriendo como máximo una profundidad de estantería de 2 posiciones de pallets, pero pudiendo satisfacer todas las restricciones del modelo. Esto habla de la no convexidad del modelo.

Al realizar la primera alternativa del estudio por categoría de producto para el depósito manual, se observó nuevamente que se alcanzaba a cumplir con la altura máxima pero esta vez los valores requeridos de profundidad para lograrlo fueron más cercanos a 1 que a 2 posiciones de pallets (siendo la máxima profundidad alcanzada 1,20). Al observar esto, se compararon las frecuencias de pedidos obtenidos para ambos casos. Se observó que para el análisis en que no se discrimina por categoría de productos, la cantidad de días para la política de despacho de los productos A tienden a ser mayores que los B y C, de esta manera obteniendo un volumen mayor de orden y así, exigiendo una mayor profundidad óptima. Pero esto no es lógico, ya que como se explicó anteriormente, la frecuencia con la que salen los productos A deberá ser mayor y para esto, la cantidad de días de la política de despacho deberá ser menor. Por esto, se concluye que el análisis por familia de productos nos brinda una solución más cercana a la realidad del trabajo día a día en el almacén.

Habiendo aplicado la fórmula del caso apilable para el almacén manual, se pasó a estudiar la misma para el depósito automático. La profundidad requerida para minimizar los desperdicios para este caso será mucho menor, ya que a pesar de que los flujos de egreso se mantienen constantes, las alturas requeridas son mucho mayores y el ancho de pasillo en posiciones de pallets es menor, haciendo que el término por desperdicio de pasillo sea menos significativo. A diferencia del depósito manual, no se alcanza la altura máxima establecida para los depósitos automáticos. Para los meses de mayor demanda cumple con la restricción exigida sobre la profundidad óptima apenas por encima de 1 posición de pallet en profundidad con una altura de 9 posiciones de pallets. Por esto se concluye que para diseñar el depósito en grandes alturas lo adecuado para minimizar los desperdicios es nuevamente, una profundidad de estantería baja.

Del análisis por categoría para este tipo de depósitos se obtienen conclusiones similares, ya que para el análisis hecho de forma general (en el que todos los productos sin importar la categoría a la que pertenezcan tendrán la misma profundidad y altura) la profundidad no alcanza a ser una posición de pallet ni siquiera para el caso de mayores exigencias sobre el almacenamiento. Para el caso del estudio por familias, para los productos C y B nunca se requería una profundidad mayor a 1, mientras que para los A se lograba, pero con la política de despacho máxima y la menor altura posible.

Por todo lo anterior, lo que el estudio sugiere es que se requerirá un valor bajo de profundidad para minimizar el desperdicio tanto para el caso manual como el automático.

A partir de la fórmula para almacenamiento en racks, se observó que se requería inclusive menos posiciones de pallet en profundidad para minimizar el desperdicio con las mismas condiciones. Esto sucede de manera tan marcada que el análisis para el caso automático por medio del modelado no se realizó, ya que observando los resultados (figura 3.8) se ve como bajo la situación de mayor exigencia (mayores tamaños de orden y altura mínima) la profundidad requerida no alcanza las 0,4 posiciones de pallets. Para el caso manual aplicando esta fórmula se observa que para ciertos arreglos se requerirán profundidades de estanterías mayor pero nuevamente, si se quiere maximizar la altura la misma será baja.

Por todo lo anterior mencionado es que se concluye que, a pesar de no llegar a un valor concreto de profundidad, si se pretende maximizar la altura de almacenamiento con los requerimientos de nuestro caso de estudio, las herramientas utilizadas indican que la profundidad óptima de estantería deberá ser baja (entre 1 y 2 posiciones de pallets).

Con respecto al estudio realizado, hay que señalar que se podría ahondar más en ciertos aspectos, como por ejemplo que pasaría si se le permitiera tener distintas alturas por familia de productos dentro del análisis general. Otro aspecto a profundizar que le agregaría valor a este análisis es la conformación de órdenes. Como se vio, esto es algo que está estrechamente ligado con las fórmulas utilizadas. En el análisis realizado se utilizó un simple ABC para distinguir las mismas, pero si se quiere hallar valores más exactos, este sería un punto a reforzar.

3.3 Dimensionamiento de las cámaras de frío

En esta sección, se mostrará cómo se llegó a obtener las medidas globales para ambos tipos de depósitos: manuales y automáticos. Vale la pena aclarar que todos los cálculos y modelos realizados en esta sección se encuentran en el anexo electrónico.³²

3.3.1. Dimensionamiento layout manual

En primer lugar, se tiene que definir la altura y profundidad de estantería a utilizar. Dado que se tiene una capacidad de almacenamiento fijo y se pretende reducir los costos de inversión se utilizará la altura máxima para así ocupar menos posiciones de pallets a nivel de piso. Por esto se define que la altura de la cámara de frío para este tipo de depósitos será de 7 posiciones de pallets. Con esta altura, los ensayos previamente realizados indican que la profundidad óptima de estantería estará entre 1 y 2 posiciones de pallets. A pesar de que se concluyó que los resultados obtenidos para el estudio por familias son más representativos de la realidad y estos indican que una profundidad cercana a una posición de pallets sería la óptima, se tomará una profundidad de 2 para este caso ya que es lo más habitual en la industria. Igualmente, vale la pena mencionar que se están siguiendo las recomendaciones de la parte anterior y se está tomando una profundidad baja.

Habiendo definido la altura en 7 y la profundidad de estantería en 2 posiciones de pallets, y conociendo que se quiere almacenar un mínimo de 6000 posiciones de pallets lo siguiente a definir es como se distribuirían estos pallets y de esta forma obtener las dimensiones de largo y ancho de la cámara. Para lograr esto se optó por realizar un modelo que minimice la superficie ocupada.

Para realizar este modelo se utilizó nuevamente la herramienta Excel ya que se observó que el mismo sería no lineal dado que se quiere minimizar un área para la cual no se conoce ni el ancho ni el largo, siendo ambas las variables de decisión.

Entonces, siendo:

- i) H el parámetro que indica el alto en posiciones de pallets (para este caso, $H=7$).
- ii) K el parámetro que indica la profundidad en posiciones de pallet (para este caso, $K=2$).

³² Archivos de Excel: "Diseño cámara manual", "Diseño cámara manual en V" y "Diseño cámaras automáticas".

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

- iii) LE la variable de decisión que indica el largo de estanterías en posiciones de pallets.
- iv) NE la variable de decisión que indica el número de estanterías de profundidad K y alto H .
- v) Lp el largo de la posición de pallet en metros.
- vi) L es el largo en metros de depósito. Aquí hay que aclarar que para simplificar se supone que el largo del depósito es igual al largo de estantería por lo que L queda calculado como $Lp * LE$.
- vii) Ap es el ancho de la posición de pallet en metros.
- viii) A es el ancho del depósito en metros. Para explicar de manera más sencilla como se calcula este, se dirá que A es igual a la suma de 3 términos (X , Y y Z) los cuales se explican a continuación:
 - a. El término X calcula el ancho de las estanterías, quedando $Ap * K * NE$.
 - b. El término Y hace referencia a los “aires” entre las estanterías el cual se tomó como 0,2 metros. Esto a pesar de no ser estrictamente necesario se hizo para darle más exactitud al modelo. El término Y es calculado por Excel de acuerdo a un condicional de la siguiente manera:
 - i. Si el número de estanterías es menor o igual a 2 se tomará un aire de 0,2 metros. Esto es lógico para el caso en que hay 2 estanterías, estrictamente para el caso de 1 debería ser 0. Pero al ser estos casos particulares e incoherentes (ya que con 1 o 2 estanterías el depósito con 6000 posiciones quedaría desproporcionado) no se le dará importancia, simplemente fue utilizado para separar estos casos por si eventualmente llegarán a ser solución.
 - ii. Si el número de estanterías es par, este término se calcula como $0,2 * 2 + \frac{NE-2}{2} * 0,2$, dado que con la primera parte de esta expresión se calcula el espacio entre las dos estanterías contra la pared del depósito y con el segundo se calcula los aires entre las estanterías restantes. Tal vez, para entender mejor esto se puede

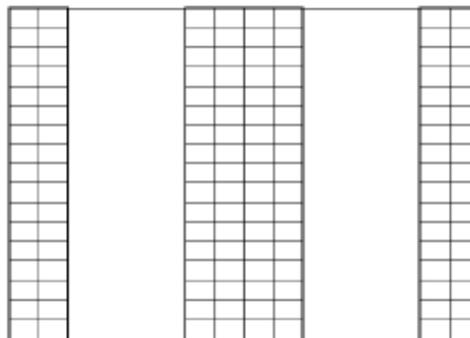


Figura 3.10: Diagrama disposición de layout (NE par)

observar la figura 3.10 en la que se muestra la distribución para un layout con un número de estanterías par.

- iii. Si el número de estanterías es impar, el término se calcula como $0,2 * 2 + \left\lceil \frac{NE-2}{2} \right\rceil * 0.2$. Con la primera parte de esta expresión se calcula el espacio entre las dos estanterías contra la pared del depósito y con el segundo se calcula los aires entre las estanterías restantes. Para esto se le saca al total de estanterías las dos que se posicionan contra la pared y se divide entre 2. Luego se redondea al entero por debajo ya que van a ser la cantidad de “agrupaciones” de estanterías³³ y a esto se lo multiplica por 0.2. Para entender mejor esto se puede observar la figura 3.11 en la que se muestra la distribución para un layout con un número de estanterías impar.

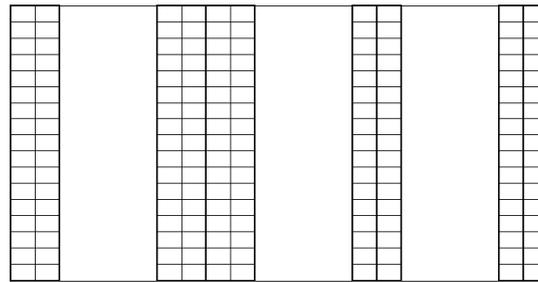


Figura 3.11: Diagrama disposición de layout (NE impar)

- c. El término Z es el ancho en metros ocupado por espacio de pasillo y es igual que para el término Y se calcula de acuerdo a un condicional que se explica a continuación:
 - i. Si el número de estanterías es igual o menor a 2, tomará como que hay un pasillo por lo que el espacio calculado (recordando que previamente se definió al pasillo como 4 posiciones de pallet) quedará $4 * Ap$.
 - ii. En el caso de que el número de estanterías sea par este término queda $\left(2 + \frac{NE-2}{2} - 1\right) * 4 * Ap$. Para este cálculo hay que mencionar que se observó que el número de pasillo es igual al número de agrupaciones de estantería menos 1.
 - iii. Si el número de estanterías es impar quedará similar a la situación anterior: $\left(2 + \left\lceil \frac{NE-2}{2} \right\rceil - 1\right) * 4 * Ap$. La diferencia es que el cociente se redondea al entero superior debido a que se quiere contar como agrupación de estantería a la estantería que no se encuentra contra la pared, que por ser NE impar queda sin ser emparejada con otra. Para entender esto se recomienda mirar la figura 3.11 la cual ilustra esta situación.

³³ Entendiendo por agrupaciones de estanterías tanto a las estanterías contra la pared como a las agrupaciones de a 2 del resto de las estanterías.

Definidos los parámetros y variables y sabiendo que, cómo se dijo anteriormente, se pretende minimizar la superficie construida pudiendo almacenar 6000 pallets, el modelo queda como se muestra a continuación:

$$\text{Mín } L * A$$

s. a.

$$H * LE * NE * K \geq 6000 \quad LE, NE \in N$$

El mismo se aplicó a dos casos distintos. Uno es el que se almacena el pallet de la manera usual en la industria, con el extremo más largo del pallet orientado hacia el frente de picking. A esto se le llamará disposición típica del pallet. El segundo caso estudiado es colocando la cara de menor longitud hacia el frente de picking. A esto se le llamará disposición atípica. Los resultados obtenidos al correr el modelo para estas dos disposiciones se muestran en la tabla 3.20. En la misma, en la primera columna se indica el valor con el que se inicializo las variables de decisión y en el resto de la tabla se pueden observar los resultados obtenidos luego de correr el modelo.

Variables de decisión (valores iniciales)	Disposición pallet	Frentes de picking	Largo estantería (LE)	Altura (H)	N° de estanterías (NE)	Profundidad de estantería (K)	Capacidad (posiciones de pallet)	Ancho depósito (m)	Largo depósito (m)	Área (m ²)
LE=20, NE=25	Típico	432	12	7	36	2	6.048	177	21,8	3.850
	Atípico	432	18	7	24	2	6.048	137	29	3.973
LE=20, NE=15	Típico	432	24	7	18	2	6.048	88,4	43,4	3.837
	Atípico	432	24	7	18	2	6.048	103	38,6	3.968
LE=51, NE=3	Típico	432	27	7	16	2	6.048	78,6	48,8	3.836
	Atípico	430	43	7	10	2	6.020	57,2	69	3.947
LE=3, NE=51	Típico	432	8	7	54	2	6.048	265	14,6	3.866
	Atípico	432	4	7	108	2	6.048	616	6,6	4.064
LE=3, NE=3	Típico	432	18	7	24	2	6.048	118	32,6	3.840
	Atípico	440	22	7	20	2	6.160	114	35,4	4.043

Tabla 3.20: Cuadro de resultados para dimensionamiento cámara manual

Se esperaba que el modelo diera una solución óptima y única para cada arreglo de pallets (típico y atípico), pero se observó que a partir de diferentes condiciones iniciales se obtenían distintas soluciones, no muy alejadas entre ellas en cuanto a superficie ocupada, pero si diferenciándose en los valores de largo y cantidad de estanterías. Por esto se puede decir que aparte de ser un problema no lineal, es no convexo ya que se da la convergencia del problema a óptimos locales. En consecuencia, se deberá elegir el mejor de los óptimos locales y asumirlo como óptimo global. Otro criterio por el que se elegirá la solución es que la misma represente una distribución lógica. Por ejemplo, si se inicializa el modelo con LE=3 y NE=51 para el layout atípico se obtiene que la distribución que optimiza la superficie es un depósito con 108 estanterías de 2 posiciones de pallet en profundidad, 7 posiciones de pallet en altura y 4 posiciones de pallet de largo, lo cual no tiene sentido.

Con esto en mente, se tomó la solución con menor superficie (3.836 m²), la cual se da con una disposición típica del pallet y consta de 16 estanterías de 2 posiciones de pallet en profundidad, 7 posiciones de pallet en alto y un largo de 27 posiciones de pallet.

3.3.2. Dimensionamiento layout manual en V

Para el modelado en V de la cámara de frío se utilizó un acercamiento mucho más artesanal que para el layout anterior. Este caso se estudió con el fin de agregar otra variante a los layouts manuales. Para la realización del mismo, el diseño se basó en el layout en V que se puede observar en la figura 3.12 [22].

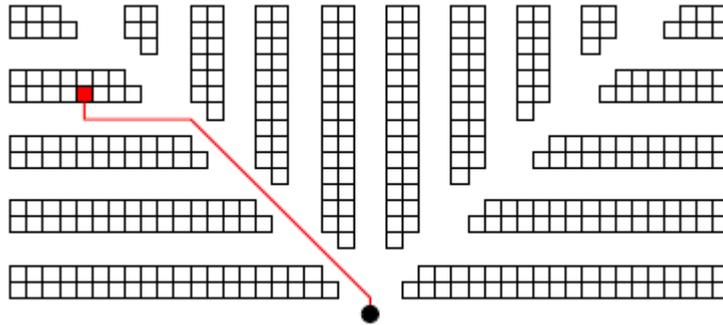


Figura 3.12: Distribución modelo en V

Este tipo de layouts tiene la ventaja que con un simple análisis ABC se puede obtener los productos de mayor rotación y ubicarlos cerca del único punto de entrada y salida del depósito, permitiendo ahorro de tiempo al momento de manejar las cargas de mayor rotación.

Para lograr obtener un depósito de al menos 6000 pallets de capacidad lo que se hizo fue tomar la distribución de la figura 3.12 y calcular que número de estanterías (verticales y horizontales³⁴) eran necesarias para cumplir con esta capacidad. Al hacer esto, se observó que utilizando tal cual la distribución tomada como ejemplo, la capacidad quedaba muy por encima de la necesaria. En consecuencia, lo que se hizo fue sacar posiciones de pallets sobre el punto de entrada y salida de mercadería y agregarlos a otras estanterías en donde fuese quedando conveniente y armónico. Al hacer esto, se logró en el espacio libre colocar las zonas de recepción y staging de mercadería las cuales se verán y definirán más adelante. En la figura 3.13 se muestra un esquema de como quedaría la mitad izquierda de la cámara de frío para este caso, pintado en gris se puede observar la zona que se destinará para el staging/recepción de los pedidos.

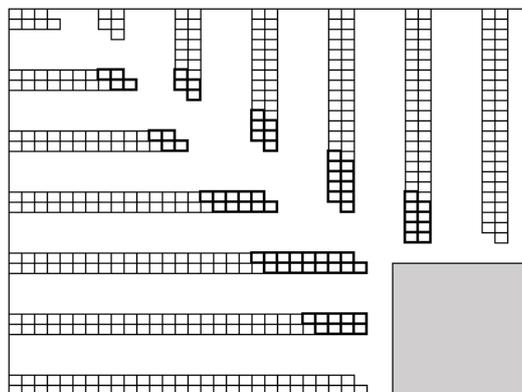


Figura 3.13: Esquema layout en V

³⁴ Esto hace referencia a como están colocadas en la vista del layout

Este esquema sirvió de apoyo para realizar los cálculos y poder concluir que el depósito requerirá de 14 estanterías horizontales y de 12 estanterías verticales. La cantidad de pallets por estantería se puede ver en la tabla 3.21 a continuación. Vale la pena aclarar que las estanterías se numeraron comenzando de la esquina superior izquierda del depósito. La huella de pallet refiere a las posiciones de pallet que la estantería ocupa en el piso y la capacidad es cuantos pallets puede almacenar (el número anterior multiplicado por 7, la altura del depósito).

#Estanteria	Estanterías horizontales		Estanterías verticales	
	Huella en pallets	Capacidad	Huella en pallets	Capacidad
1	7	49	5	35
2	19	133	17	119
3	27	189	27	189
4	41	287	39	273
5	55	385	44	308
6	56	392	45	315
7	55	385		

Tabla 3.21: Cantidad de pallets por estantería en layout en V

Hay que aclarar que en la tabla de resultados se muestra las capacidades de las estanterías que se usaron para dimensionar el depósito, ósea las que se pueden observar en la figura 3.13. Para obtener la capacidad total simplemente se tiene que sumar las capacidades de todas estas estanterías y multiplicarlas³⁵ por 2, lo que resulta en una capacidad de 6118 pallets.

3.3.3. Dimensionamiento layout escenarios automáticos.

Para el diseño de las cámaras de depósitos automáticos se tuvieron en cuenta los siguientes lineamientos:

- i) Por lo concluido en la sección de profundidad se pretenderá diagramar estos depósitos con una profundidad baja.
- ii) La altura de almacenamiento será elevada porque los transelevadores automáticos se benefician de ella (como ya se explicó anteriormente) y también porque se quiere minimizar la superficie ocupada.

A diferencia del caso manual, en el automático no se tendrá tanta libertad para diseñar las cámaras de frío ya que el número de pasillo estará directamente ligado al número de transelevadores. Dicho esto, para comenzar con el diseño de estas cámaras se precisará definir qué cantidad se utilizará. Dado que son elementos caros se pretenderá tener el menor número posible de modo que se pueda cumplir con los requerimientos de la instalación. Por esto, lo que se hizo fue poner un límite de 2 transelevadores y luego por medio de un sencillo análisis de tiempo del peor y el caso promedio se determinó que se puede cumplir con los requerimientos de la instalación.

³⁵ Esto se hace, debido a que para dimensionar el layout se aprovechó su simetría y se diseñó solo para una mitad.

Habiendo tomado 2 transelevadores las posibilidades de layouts son los mostrados a continuación:

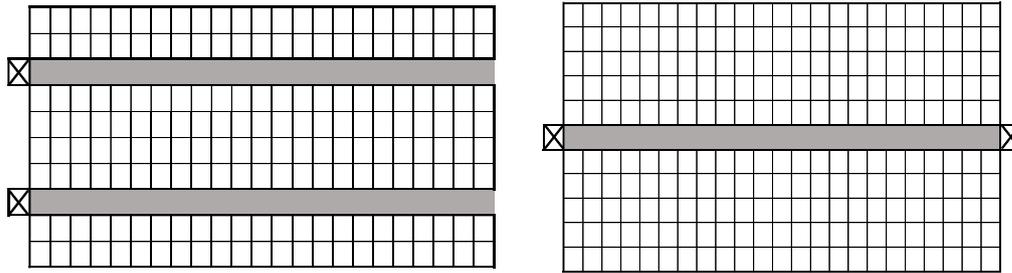


Figura 3.14: Esquema de layouts automáticos

Vale la pena aclarar que el diseño con un pasillo para transelevador requerirá igualmente dos transelevadores debido a que si uno se rompe o precisa mantenimiento la producción podría continuar utilizando el otro. Estos dos transelevadores no podrán funcionar al mismo tiempo y como se ve en la figura 3.14, mientras uno funciona el otro descansará en cualquiera de los extremos del pasillo.

Definidos los esquemas de los depósitos a diseñar, el siguiente paso será poner restricciones sobre las medidas para poder diagramar las cámaras. Originalmente se pretendía diagramar ambos diseños con túneles de picking, en la figura 3.15 se ilustra esto:

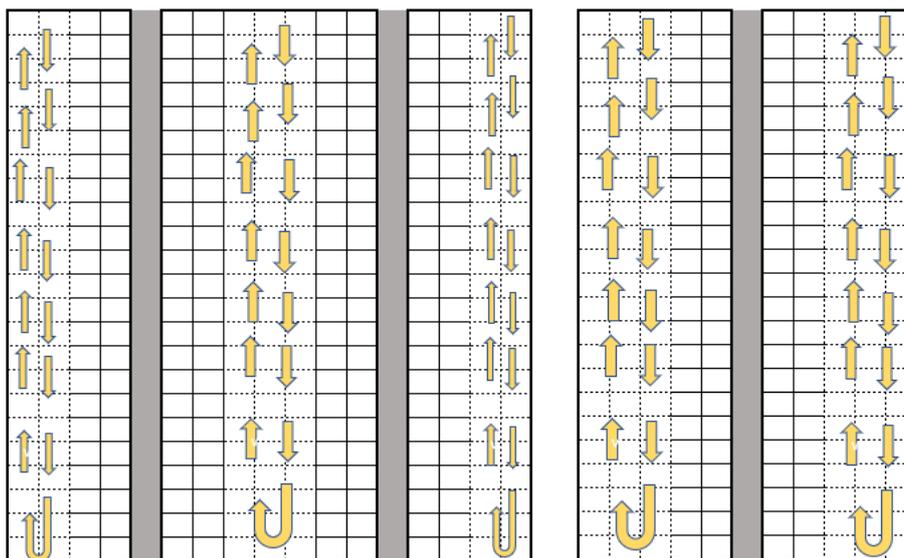


Figura 3.15: Diagrama depósitos automáticos con túnel de picking

Pintado en gris se observan los pasillos de transelevador, las estanterías inmediatamente al lado de profundidad 2 se extienden del piso al techo con sus dos niveles inferiores destinados al picking. Las estanterías marcadas con línea punteada tendrán los dos primeros niveles libres para que los operarios puedan pasar con los transpaletas y realizar las operaciones de picking. Vale la pena aclarar que los pasillos para el caso con dos transelevadores solo permiten el pasaje de una maquinaria para picking a la vez.

Para entender mejor esta disposición en la figura 3.16 se muestra un corte frontal de uno de estos layouts. En rojo se recuadran los túneles de picking.

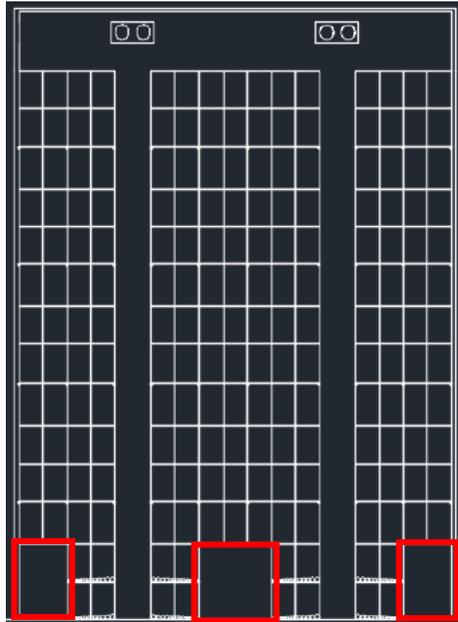


Figura 3.16: Corte frontal Layout automático

Una tercera alternativa que se evaluó como una variante al layout de dos pasillos, fue realizar el picking fuera de la cámara de frío. El transelevador deposita el pallet en una cinta transportadora para llevarlo hacia la zona de picking y luego devolverlo al almacenamiento. Esto se ilustrará más adelante en la sección de layouts, pero lo importante a mencionar aquí es que en este caso no se necesitaría el túnel de picking y todo ese espacio se destinará a almacenamiento.

Para hallar las medidas del depósito lo que se hizo fue simplemente partir del requerimiento de un mínimo de 190 posiciones de picking (teniendo en cuenta que el picking se puede realizar en una altura de 2). Como se observa en los diagramas anteriormente vistos, teniendo los frentes de picking se tiene el largo del depósito. El ancho ya se encuentra determinado dependiendo de que configuración se tome y teniendo la capacidad requerida de 6000 pallets queda determinada la altura. En consecuencia, lo que se hizo fue ir variando el número de frentes de picking y observar las dimensiones resultantes. Los resultados para las 3 opciones de layout automático se muestran en las siguientes tablas: 3.22, 3.23 y 3.24.

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

Frentes de picking	Ancho (m)	Largo (m)	Alto (m)	Area (m ²)	Largo/Alto	Capacidad (pallets)	Volumen (m ³)
190	21,6	43	35	923	124%	6.148	31.913
209	21,6	47	31	1.016	150%	6.114	31.913
230	21,6	52	29	1.118	181%	6.078	31.913
253	21,6	57	26	1.230	219%	6.037	31.913
279	21,6	63	24	1.356	267%	5.992	31.913
307	21,6	69	21	1.492	323%	5.943	31.913
338	21,6	76	19	1.643	391%	5.889	31.913
372	21,6	84	18	1.808	474%	5.829	31.913
410	21,6	92	16	1.993	576%	5.763	31.913

Tabla 3.22: Resultados para cámara de frío automático con túneles de picking y 2 pasillos de transelevador

Frentes de picking	Ancho (m)	Largo (m)	Alto (m)	Area (m ²)	Largo/Alto	Capacidad (pallets)	Volumen (m ³)
190	13,8	86	26	1.180	324%	6.315	31.149
209	13,8	94	24	1.298	392%	6.287	31.149
230	13,8	104	22	1.428	475%	6.255	31.149
253	13,8	114	20	1.571	574%	6.221	31.149
279	13,8	126	18	1.733	698%	6.182	31.149
307	13,8	138	16	1.906	846%	6.140	31.149
338	13,8	152	15	2.099	1025%	6.093	31.149
372	13,8	167	13	2.310	1241%	6.042	31.149
410	13,8	185	12	2.546	1508%	5.985	31.149

Tabla 3.23: Resultados para cámara de frío automático con túneles de picking y 1 pasillo de transelevador

Frentes de picking	Ancho (m)	Largo (m)	Alto (m)	Area (m ²)	Largo/Alto	Capacidad (pallets)	Volumen (m ³)
190	21,6	43	32	923	134%	6.000	29.549
209	21,6	47	29	1.016	162%	6.000	29.549
230	21,6	52	26	1.118	196%	6.000	29.549
253	21,6	57	24	1.230	237%	6.000	29.549
279	21,6	63	22	1.356	288%	6.000	29.549
307	21,6	69	20	1.492	349%	6.000	29.549
338	21,6	76	18	1.643	423%	6.000	29.549
372	21,6	84	16	1.808	512%	6.000	29.549
410	21,6	92	15	1.993	622%	6.000	29.549

Tabla 3.24: Resultados para cámara de frío automático sin túneles de picking y 2 pasillos de transelevador

El siguiente paso será seleccionar una combinación de medidas para cada alternativa de depósito. Para esto no solo se tuvo en cuenta que se minimicen los metros cuadrados ocupados, ya que si se hubiese hecho esto simplemente se hubiera tomado para todas las opciones el diseño que tiene menor cantidad de frentes de picking. También se tuvo en cuenta que, como se dijo anteriormente, los transelevadores necesitan de una considerable longitud de carrera para que su funcionamiento sea efectivo en cuanto a ahorro energético. Es por esto que para seleccionar las medidas de estas cámaras de frío se tomó el criterio de elegir las que tenían una relación de largo/ancho más parecida al depósito automático que se visitó durante la investigación para el proyecto: el de

Megapharma. Las opciones que se adecuan más a lo recién mencionado se encuentran resaltadas en verde y se desarrollan a continuación:

- i) Escenario automático 2 pasillos con picking integrado
 - a. Frentes de picking: 253
 - b. Largo: 57 metros, lo que equivale a 32 posiciones de pallet
 - c. Alto: 26 metros, lo que equivale a 14 posiciones de pallet
 - d. Área: 1230m²

- ii) Escenario automático 1 pasillo
 - a. Frentes de picking: 190
 - b. Largo: 86 metros, lo que equivale a 48 pallets
 - c. Alto: 26 metros, lo que equivale a 14 posiciones de pallet
 - d. Área: 1180 m²

- iii) Escenario automático 2 pasillos con picking exterior
 - a. Frentes de picking: 253
 - b. Largo: 57 metros, lo que equivale a 32 posiciones de pallet
 - c. Alto: 24 metros, los que equivale a 13 posiciones de pallet
 - d. Área: 1230m²

Terminando esta sección vale la pena mencionar que las dimensiones para las cámaras mostradas anteriormente conformarán las distintas opciones que se tomarán para realizar los layouts completos (con zonas aledañas). Es pertinente aclarar que algunas medidas sufrirán cambios por distintas razones (normativa, razones operativas, etc.), estos se aclararán en el capítulo destinado a los layouts, pero se puede adelantar que no serán de gran magnitud.

4. Aire acondicionado y sistema anti-incendios

4.1 Introducción

Como se ha mencionado anteriormente, el producto a almacenar tiene la particularidad de ser un producto congelado. En este capítulo, se desarrollará información de los aires acondicionados necesarios para el almacenamiento de artículos congelados y posteriormente se dimensionará un almacén a 25°C bajo cero.

Adicionalmente, se planificará que sistema de prevención de incendios se utilizará. La investigación de la normativa uruguaya fue muy compleja al no encontrar la información necesaria disponible y se tuvo que recurrir a normativas de otras regiones como la Unión Europea o Estados Unidos. Lo que agrega dificultad a este punto es que, al tratarse de un depósito de congelados, muchos de los métodos tradicionales para prevención de incendios no pueden utilizarse. A modo de ejemplo, no se pueden usar rociadores de agua, ya que la misma se congelaría. Otro factor que es difícil de encontrar presente en la normativa existente, es la altura del almacén. Cuando se tienen almacenes automáticos que pueden alcanzar una altura de 40 m se necesita tener en cuenta cuestiones particulares, por ejemplo no alcanzará con poner aspersores únicamente en el techo del mismo. Todo lo mencionado se tendrá en cuenta para diseñar el sistema de prevención de incendios.

4.2 Estructura

La primera decisión a tomar, será cual va a ser la estructura de la cámara frigorífica. Se tienen dos grandes opciones: optar por los métodos tradicionales o por métodos prefabricados conocidos como paneles sándwich [27].

Los almacenes frigoríficos de carácter tradicional, constan habitualmente de una estructura pesada con una elevada inercia térmica, lo que favorece una estabilidad de temperatura y humedad en el interior de la cámara, y elevada resistencia al fuego. Se utiliza un aislante a base de poliuretano aplicado sobre muros de fábrica y pisos clásicos.

Por otro lado, están los almacenes construidos por panel sándwich prefabricado. Este tipo de cámaras están totalmente estandarizadas en la actualidad. Utilizan como elemento constructivo el panel sándwich frigorífico. Este panel sándwich consta con dos planchas de acero o aluminio, y en el medio una inyección de espumas de poliuretano (hay variantes por ejemplo el uso de polisocianurato (PIR) está cada vez más consolidado en razón de su buen comportamiento contra el fuego), consiguiendo un producto final homogéneo, ligero y de una gran autoportancia.

Algunas de las ventajas³⁶ de estos elementos son las siguientes:

- i) Son elementos modulares
- ii) Pueden construirse de diferentes espesores dependiendo del uso que se le quiera dar
- iii) Propiedades mecánicas aceptables
- iv) Elevada resistencia al calor

³⁶ Ventajas obtenidas luego de investigación en mercado de diferentes proveedores y opiniones de profesionales.

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

- v) Acabados higiénicos y sanitarios, lo que es fundamental en la industria alimentaria
- vi) Al ser un elemento estandarizado, su costo es moderado
- vii) Se pueden fabricar piezas de hasta 16 metros de largo

Como se mencionó, una de las características del panel sándwich es la variedad de grosores en las cuales se puede fabricar. La elección dependerá de la temperatura deseada adentro de la cámara frigorífica ya que más adelante se indicará como el grosor se relaciona directamente con la capacidad de aislación térmica. Los espesores más finos de 60 o 80 mm, serán para las cámaras con temperaturas mayores a los 0°C. Los grosores medios de 100,120 o 140 mm se utilizan para almacenes con temperaturas que rondan los 10°C bajo cero. Por último, para cámaras industriales de ultracongelación, se recomiendan grosores más elevados, de 160,180, 200 e incluso hasta 250 mm [27].

Cada uno de estos grosores, tendrá un coeficiente de transmisión térmica, parámetro que luego se utilizará para calcular la pérdida térmica por las paredes. A continuación, se exponen a modo de ejemplo en la tabla 4.1, los coeficientes térmicos para ciertos grosores [28].

Espesor	Coficiente de transmisión térmica
mm	Kcal/m ² °C
60	0,27
80	0,2
100	0,16
120	0,13
140	0,12
160	0,1
180	0,09
200	0,08

Tabla 4.1: Propiedades de paneles sándwich según espesores

Los paneles sándwich también pueden utilizarse para el techo.

Para el piso hay dos opciones: utilizar paneles o construir una solera correctamente aislada. La primera opción generalmente se utiliza para cámaras frigoríficas de carga manual y con pesos de carga estática menores a 1500kg/m² y carga dinámica menores a 500kg/m². Para la construcción de una solera, se requiere una serie de pasos a seguir los cuales conforman diferentes capas [27].

Las aberturas, son otra pieza fundamental, las cuales se fabrican específicamente para que encastran con los paneles logrando un aislamiento óptimo. Adicionalmente, se suele utilizar box de ingreso y egreso, para evitar el choque térmico provocado por la diferencia de la temperatura exterior e interior de la cámara frigorífica.

Dicho todo esto, se tomó la decisión de utilizar paneles sándwich para paredes y techo y construir una solera para el piso. Para definir el espesor del mismo se utilizaron dos métodos:

- i) Gráfica obtenida de catálogo internacional [29]: para utilizar este método necesitamos la temperatura interior y la temperatura exterior. La temperatura interior fue definida al principio del capítulo. La temperatura exterior se tomará de 32°C ya que es lo que se concluyó luego de

discutirse con profesionales del área, teniendo en cuenta la temperatura en el verano uruguayo.

Temperatura interior= -25 °C

Temperatura Exterior= 32 °C

$\Delta T =$ Temperatura Exterior – Temperatura Interior

$\Delta T = 57$ °C

Variables de la figura 4.1

Y: Diferencia de Temperatura Δt (°C)

X: Pérdidas Térmicas Q (W/m²)

Las diferentes curvas trazadas sobre la gráfica representan los diferentes espesores para los paneles.

Para la temperatura interior que se está considerando, según la fuente de la cual se extrajo la tabla, se recomienda tomar el valor de la pérdida térmica igual a 8 W/m². Si se ingresa a la gráfica de la figura 4.1 con el valor Y=57 °C y el valor X= 8 W/m² se puede ver que se intercepta la línea de espesor 7", lo que equivale a 177,8 mm.

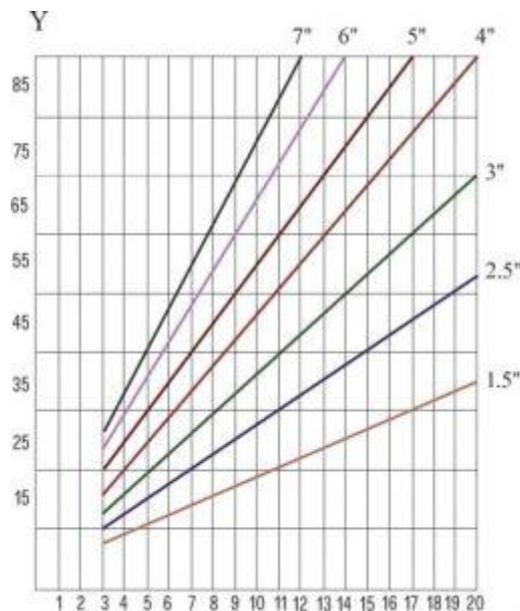


Figura 4.1: Gráfica doble entrada: Pérdidas térmicas y variación de temperatura para obtener espesor

- ii) Como segunda opción, se consultó con diferentes proveedores locales [30]. Se obtuvo un consenso sobre que para las temperaturas que se desean manejar se utilizan grosores de 160, 180 e incluso 200mm.

Teniendo en cuenta la coherencia entre las dos opciones consultadas, se optó por utilizar 200 mm de espesor para los paneles.

Sobre la construcción de la solera, no se entrará en detalle.

Una vez definida la estructura, debemos seleccionar los equipos necesarios para el sistema de refrigeración.

4.3 Sistema de refrigeración y carga térmica

Para la refrigeración de productos es necesario la presencia de un ciclo de refrigeración. En los ciclos de refrigeración, el refrigerante se evapora y condensa alternadamente.

Los elementos del sistema de refrigeración forman un circuito y corresponden a dispositivos mecánicos y térmicos. Los elementos principales son los siguientes [31]:

- i) Compresor: aspira el refrigerante que viene del evaporador en forma de vapor y lo transporta al condensador aumentando su presión y temperatura.
- ii) Evaporador: es el lugar de la instalación donde se produce el intercambio térmico entre el refrigerante y el medio a enfriar.
- iii) Condensador: tiene la función de poner en contacto el vapor refrigerante que viene del compresor con un medio condensante para licuarlo.
- iv) Dispositivo de expansión: este elemento está localizado cerca del evaporador, su misión es controlar el paso del refrigerante y separar la parte de alta presión con la de baja presión.

Algunos elementos secundarios son el filtro deshidratador, separador de aceite, indicador de humedad y líquido, presostato de baja presión, presostato de alta presión, acumulador de líquido y válvula de solenoide entre otros.

El refrigerante es esencial para definir todos los equipos del sistema. Por ejemplo, los evaporadores para refrigerantes fluorados o CO₂, se instalan con tubería de cobre y aletas de aluminio. Por otro lado, los evaporadores que emplean el amoníaco como refrigerante, deben ser de acero inoxidable [32].

Los gases refrigerantes, más específicamente los CFC o clorofluorocarbonados, son muy dañinos para el medio ambiente. Se está volviendo a utilizar el amoníaco como refrigerante ya que no perjudica la capa de ozono y tiene mayor eficiencia energética que los CFC. Por lo recién mencionado, se eligió NH₃ como refrigerante para el diseño.

Las cámaras frigoríficas son depósitos aislados y se diseñan con la finalidad de minimizar la entrada de calor exterior.

Se denomina carga térmica al calor total que entra o se genera en la cámara. Para mantener una baja temperatura en la cámara, es necesario que el equipo frigorífico seleccionado evacue el calor. Por lo que calcular el calor que se introduce a la cámara, es fundamental para la elección de los equipos.

Clasificaremos las fuentes de calor en las siguientes 3:

- i) Pérdida a través de las paredes y techo: el calor se propaga hacia el interior por conducción. Se calcula con la fórmula debajo en la Figura 4.3 y le llamaremos Q_p [33].

$$Q_p = S \times \frac{\lambda}{e} \times (T_e - T_i)$$

- S es la superficie de paredes, suelo y techo de la cámara en m².
- λ es el coeficiente de conductividad térmica del aislante en W/mK (tabla 2).
- e es el espesor del aislante en metros.
- T_e y T_i son las temperaturas exterior e interior de la cámara en grados Kelvin (K) o en grados centígrados (°C) indistintamente.

Figura 4.2: Ecuación para cálculo de pérdida de calor por paredes y techo

Q_p se obtiene en Watts (W), o lo que es lo mismo J/s; por lo que la expresión anterior nos proporciona el calor que atraviesa la pared en cada segundo. Para obtener el calor que entra diariamente multiplicamos por los 86400 segundos que tiene un día. Por otra parte, para obtener el resultado en KJ dividimos la expresión entre 1000.

La expresión queda de la siguiente forma (para obtener Q_p en kJ/día):

$$Q_p = S \times \frac{\lambda}{e} \times (T_e - T_i) \times 86,4$$

- ii) Calor por servicio: se refiere a las ganancias de calor por aperturas de puertas, motores, iluminación, personas. Están directamente relacionadas con el tamaño de la cámara y su cuantificación aproximada puede obtenerse como porcentaje de las ganancias de calor a través de las paredes. Se definirá como Q_s [34].

$$Q_s = \%Q_p$$

Los valores utilizados en la industria, son 10% para grandes cámaras de conservación, 25% para cámaras de mediano tamaño y 40% para restaurantes, bares y pastelerías [35].

- iii) Carga de género: Normalmente el producto que se introduce en la cámara está a una temperatura más elevada que la interior. La expresión siguiente (figura 4.3) nos permite obtener el calor a extraer para que la temperatura del producto ingresado descienda hasta la temperatura de conservación (siempre que no haya un proceso de cambio de fase).

$$Q_g = m \times C_e \times (T_{ent} - T_i)$$

- m es la masa de género que se introduce diariamente (kg/día).
- C_e es el calor específico del género en kJ/kgK
- T_{ent} es la temperatura de entrada del género en K.
- T_i es la temperatura interior de la cámara en K.
- Q_g se obtiene en kJ/día.

Figura 4.3: Ecuación para cálculo de pérdida de calor por genero

En resumen, la carga térmica diaria a partir de ahora se llamará Q_t , su unidad será kJ/día y estará conformada de la siguiente forma:

$$Q_t = Q_p + Q_s + Q_g$$

Se procederá a realizar los cálculos para los escenarios definidos en el capítulo anterior pero antes se nombrarán ciertas consideraciones para los mismos.

- El calor por género se tomó como 0 en base a la suposición de que los productos ingresan a la misma temperatura que se almacenan.
- Para el cálculo del calor transferido a través de las paredes, se tomó el valor del catálogo para la variable λ/e teniendo en cuenta la elección de utilizar un espesor de panel sándwich de 200 mm. El valor se obtuvo de la figura 4.1.
- Temperatura exterior máxima se consideró 35°C.
- Se usa una simplificación al suponer que el cálculo de calor transferido por el suelo es el mismo que el cálculo de calor transferido por las paredes.

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

- El calor de servicio se estimó como diferentes porcentajes dependiendo del escenario. La tabla 4.2 a continuación lo representa. Estos porcentajes fueron estimados por los autores del proyecto basándonos en la bibliografía ya mencionada y teniendo en cuenta que a más automatización menor pérdida de calor por servicio. Esto se justifica por el hecho de que los escenarios manuales tienen el calor humano de los operarios, iluminación, apertura de puertas, etc. Mientras que para los modelos automáticos con picking integrado, debido a que los operarios dentro del depósito participarán solo del picking, necesitarán iluminación únicamente en pasillos de picking. Finalmente, el modelo automático de 2 pasillos con picking exterior, puede funcionar sin operarios dentro del almacén, lo que se traduce en que puede funcionar también sin iluminación.

Escenarios	% de pérdidas por servicio
Manual	10%
Manual en V	10%
Automático 1 pasillo	5%
Automático 2 pasillos picking integrado	5%
Automático 2 pasillos picking exterior	1%

Tabla 4.2: Porcentajes de pérdida de calor por servicio según escenario

Se procederá a realizar los cálculos de carga térmica para el escenario manual.

Teniendo en cuenta las dimensiones definidas en el capítulo anterior, expuestas en la tabla 4.3, se calculan los m² de superficie en la tabla 4.4.

Ancho (m)	Largo (m)	Altura (m)
78,6	48,8	13,3

Tabla 4.3: Dimensiones de escenario manual

Paredes (m2)	3.389
Techo (m2)	3.836
Suelo (m2)	3.836
Total (m2)	11.060

Tabla 4.4: Datos de superficie de escenario manual

En la tabla 4.5, se resumen todos los parámetros antes de aplicar las fórmulas vistas anteriormente para el cálculo de Q_p, Q_s y Q_t.

T_i (°C)	-25
T_e (°C)	35
S (m²)	11.060
l/e (W/m²·K)	0,10

Tabla 4.5: Parámetros para escenario manual para el cálculo de Q_p, Q_s y Q_t

Aplicando las fórmulas para obtener Q_p , Q_s y Q_t , se llega a los resultados expuestos en la tabla 4.6.

Escenario manual		
Q_p	5.618.936	Kj/día
Q_s	561.894	Kj/día
Q_t	6.180.829	Kj/día
Q_t	107	KW

Tabla 4.6: Resultado de carga térmica para escenario manual

En la tabla se observan dos valores de Q_t , y la diferencia es la unidad en la que se está considerando. El cálculo primario de Q_t se realizó en Kj/día. Era de interés para un posterior cálculo de la energía necesaria obtener este valor en KW. Para el cálculo de este valor, se consideró que el sistema de refrigeración operará 16 horas diarias [33] y no la totalidad del día para considerar paradas por mantenimiento y otras posibles situaciones.

El detalle del cálculo para el resto de los escenarios se encuentra en el anexo electrónico. En las figuras a continuación se exponen resultados por escenarios.

Escenario manual en V		
Q_p	9.449.517	Kj/día
Q_s	1.417.428	Kj/día
Q_t	10.866.945	Kj/día
Q_t	189	KW

Tabla 4.7: Carga térmica para escenario manual en V

Escenario automático 1 pasillo		
Q_p	4.286.246	Kj/día
Q_s	214.312	Kj/día
Q_t	4.500.558	Kj/día
Q_t	78	KW

Figura 4.8: Carga térmica para escenario automático 1 pasillo

Escenario automático 2 pasillos picking integrado		
Q_p	3.618.989	Kj/día
Q_s	180.949	Kj/día
Q_t	3.799.938	Kj/día
Q_t	66	KW

Figura 4.9: Carga térmica para escenario automático 2 pasillos picking integrado

Escenario automático 2 pasillos picking exterior		
Q_p	3.062.865	Kj/día
Q_s	30.629	Kj/día
Q_t	3.093.494	Kj/día
Q_t	54	KW

Figura 4.10: Carga térmica para escenario automático 2 pasillos picking exterior

Con los valores de carga térmica hallados y la selección del refrigerante ya realizada se procederá a elegir los elementos principales del sistema de refrigeración y calcular la cantidad necesaria para cada escenario.

Lo primero que se va a seleccionar y en lo que se pondrá más énfasis es el evaporador por tratarse del elemento a integrar en el layout y en los cálculos de consumo de energía. Son muchos los evaporadores existentes en el mercado y hay varios puntos a tener en cuenta a la hora de seleccionar el equipo:

i) El material debe tener compatibilidad con el refrigerante: En este caso, al haberse elegido amoníaco, deberá ser de acero inoxidable.

ii) Circulación de aire: pueden ser estáticos o dinámicos. Los estáticos suelen utilizar la convección para la transferencia de calor mientras que los dinámicos típicos utilizan las aletas y el movimiento de aire para el mismo fin. Los dinámicos tienen mayor rendimiento, mientras para la conservación de productos delicados como flores o alimentos se prefieren los estáticos. Para ayudar la comprensión a continuación se exponen imágenes de ambos equipos, [36] y [37] respectivamente.



Figura 4.4: Evaporador estático



Figura 4.5: Evaporador dinámico

iii) Forma: Cúbicos, de plafón o murales. Los cúbicos son los más utilizados por su sencillez y efectividad [38].

iv) Flujo de aire: deberá ser tal que toda la mercadería se alcanzada. Deberá dejarse libre como mínimo la altura del evaporador entre la parte superior de la estantería y el techo para asegurar una buena circulación [38]. Se expone en la siguiente figura para el mejor entendimiento del concepto.

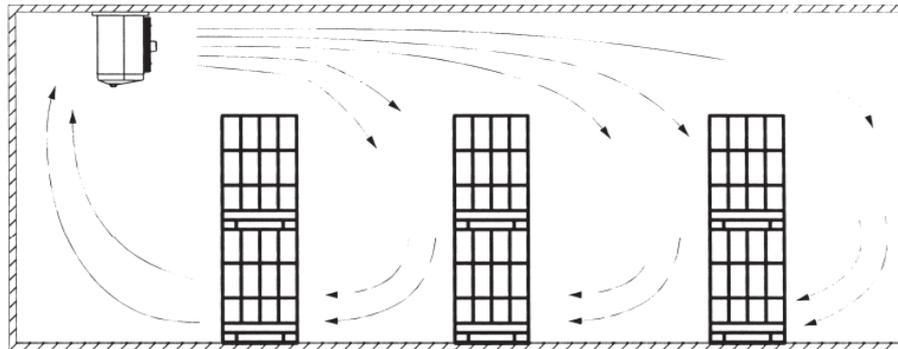


Figura 4.6: Ejemplo de correcto flujo de aire de los evaporadores

v) Separación de aletas: Un mismo tipo de evaporador puede comercializarse con distinta separación de aletas dependiendo de la función. Una pequeña separación de aletas se traduce en un mayor número de ellas por unidad de longitud y esto equivale a una mayor superficie de intercambio entre el aire y el refrigerante. Como consecuencia se traduce en un mayor rendimiento del evaporador. Lo que sucede en temperaturas negativas es que se prefiere evitar la grande separación para evitar que la escarcha se acumule entre las paletas y bloqueé la circulación de aire. A continuación, se expone la separación de paletas recomendada en función de la temperatura en la figura 4.7 [33].

Separación entre aletas	3 ÷ 4,5 mm	5 ÷ 6 mm	≥ 7 mm
Tª de la cámara	10 ÷ 0 °C	0 ÷ -7 °C	-18 ÷ -25 °C
Producto	Frutas / Verduras	Carne / Pescado	Congelados

Figura 4.7: Información de separación entre aletas según temperatura

vi) Modelo de descarche: Generalmente se utiliza un sistema eléctrico.

vii) Una vez que se ha decidido todo lo anterior, se deberá elegir aquel cuya capacidad sea la más próxima a las necesidades del proyecto.

Para la elección, se tomaron una serie de decisiones como consecuencia de la necesidad del caso de estudio. En primer lugar, se necesita que el evaporador sea de acero inoxidable por el refrigerante elegido. Adicionalmente se decidió que sea cúbico por su simplicidad y eficiencia. Las paletas mayores o iguales a 6 mm debido a la temperatura objetivo. Luego de estas resoluciones, solo basta con la carga térmica total ir a las especificaciones del equipo y elegir uno que cumpla estos requisitos y decidir la cantidad necesaria.

En el anexo electrónico³⁷ se indica como decidir a partir de un determinado catálogo cuál es el equipo más conveniente y cuantos equipos son necesarios en cada escenario teniendo en cuenta la potencia del evaporador y la carga térmica correspondiente.

³⁷ Archivo “Carga térmica”, pestaña: “Evaporadores”

Se utilizarán los resultados de cantidad de evaporadores obtenidos en el (ya citado) electrónico para cada escenario. Estos equipos serán representados luego en los layouts correspondientes.

Escenarios	Cantidad de unidades evaporadoras a instalar
Manual	4
Manual en V	6
Automático 1 pasillo	3
Automático 2 pasillos picking integrado	3
Automático 2 pasillos picking exterior	3

Tabla 4.11: Cantidad de evaporadores necesarios por escenario

Para el resto de los elementos del sistema de refrigeración, se utilizaron aproximaciones más gruesas, ya que no es el énfasis del presente trabajo. Adicionalmente estos elementos estarán ubicados en la sala de máquinas la cual queda fuera del alcance del proyecto en cuanto a layouts. La sala de máquinas si se tendrá en cuenta en el momento de dimensionar los costos. A continuación, se encuentran algunos detalles sobre el compresor y las cañerías y con estos dos elementos se dará como finalizada la sección de refrigeración.

Sobre el compresor, normalmente, las instalaciones que trabajan con potencias medias y altas, lo hacen con compresores de tornillo los cuales son más costosos, pero son más eficientes. Para elegir, usamos los catálogos de una empresa alemana [39].

En el caso de las cañerías, como el refrigerante primario es amoníaco, no es posible utilizarlas de cobre, por lo que se utiliza el acero. Los aceros al carbono más comunes para instalaciones de amoníaco con temperaturas no menores a -29°C son el A53 y el A106 [40].

4.4 Sistema anti-incendios

Con respecto a este tema, luego de una investigación de la normativa uruguaya y por medio de intercambios con los distintos profesionales del área que se tuvieron a lo largo de la investigación, se puede decir que la misma es escasa y poco clara con respecto a las medidas necesarias para prevenir y contener este tipo de accidentes. Igualmente se estudiarán debido a que es necesario que los diseños cumplan con estos requerimientos mínimos. En los puntos que parezca pertinente ser más minucioso se utilizara la norma NPFA, la cual es una normativa americana que se utiliza como guía en muchos países de Latinoamérica.

4.4.1 Aplicación normativa uruguaya

El primer paso para aplicar la normativa uruguaya es clasificar la instalación según el riesgo de incendio. Lo lógico es que para todas las instalaciones de estas características sea elevado ya que se trata de un almacén frigorífico, lo cual hace que sea un ambiente seco y más propenso a incendios, con una gran densidad de productos y almacenados en elevadas alturas. Igualmente, para una confirmación rigurosa se utilizó la

metodología establecida en la normativa “IT12- Carga de fuego en edificaciones y áreas de riesgo de la Dirección Nacional del Bomberos de Uruguay [41].

Para definir el riesgo, antes, se tiene que clasificar la instalación según su actividad. Para esto se observó que dentro del listado de industrias con cargas de fuego calculadas no había ninguna opción que se adecuara a un almacén de productos congelados. Por este motivo, se clasificó el depósito dentro del Grupo I (edificaciones destinadas a depósitos) y como lo indica la norma, se aplicó la metodología establecida para calcular la carga de fuego y así determinar el riesgo. Cabe destacar que se plantea que esta metodología debe ser utilizada para espacios con áreas menores a 500m² o en caso de áreas de mayor envergadura se podrá utilizar “*cuando el espacio analizado tenga materiales combustibles con poderes caloríficos semejantes y uniformemente distribuidos*” [41]. Para el cálculo realizado se asumirá esto cierto ya que los layouts de los distintos almacenes van aproximadamente desde los 1000m² a los 6000m². Igualmente, esto es lógico ya que todos los almacenes contienen aproximadamente 6000 posiciones de pallets de productos de similares características y, por tanto, similares poderes caloríficos.

Para realizar los cálculos se estudiaron dos alternativas: una con pallets de madera y otra con pallets de plástico. Otro punto importante a mencionar es que para estos cálculos se dejó de lado tanto las estanterías como el producto congelado ya que realizando los cálculos sin estos elementos se observó que el riesgo resultante para todas las instalaciones era alto.

Los elementos tomados en cuenta para el cálculo fueron los siguientes:

Material	m(kg) por unidad
Envase plástico	0,06
Envoltorio papel	0,001
Pallets madera	30
Pallets plástico	20

Tabla 4.12: Peso de elementos para calcular carga térmica

Vale la pena aclarar que el peso del envase de plástico se aproximó al doble del peso de una botella de 1,5 litros de plástico [42]. Los pesos de los pallets de madera [43] y plástico [44] fueron extraídos de proveedores y el peso de los envoltorios de papel fue estimado.

Se supuso en base una tesis de grado [45] sobre productos congelados que la distribución de los productos era 10% productos con envoltorio de papel y 90% con envase plástico. Para estimar las cantidades de envoltorio por pallet, para el caso de los envoltorios de papel se tomó el SKU con mayor cantidad de unidades por pallet (8000) ya que se supuso que este envoltorio se utilizaría en los productos de menor tamaño. Para los envases de plástico se tomó como referencia la cantidad de envases por pallet para el producto de mayor demanda de la tesis previamente mencionada (582). Con esto y sabiendo que se tienen 6000 pallets (aproximadamente), se calculó el peso total de los elementos a almacenar. En la tabla 4.13 se muestran los mismos junto a las respectivas cargas térmicas de cada concepto, extraídas del anexo de la normativa. Vale la pena aclarar que aquí se realizó otra suposición, se asumió que el plástico del

envase y el del pallet son el mismo, por esta razón tienen la misma carga térmica específica.

Material	Carga térmica específica (MJ/kg)	Cantidad	Peso (kg)
Envoltorio papel	17	4.800.000	48.000
Envase plástico	39	3.142.800	188.568
Pallet madera	19	6.000	180.000
Pallet plástico	39	6.000	120.000

Tabla 4.13: Carga térmica por unidad de masa

Utilizando la fórmula indicada por la norma:

$$q_{fi} = \frac{\sum M_i H_i}{A_f}$$

Donde:

- i) q_{fi} es el valor de la carga de incendio específica en MJ/m² (área de piso).
- ii) M_i es la masa total de cada componente i de material combustible (Kg). La norma plantea que este valor no podrá ser excedido durante la vida útil de la edificación excepto cuando exista alteración de ocupación, ocasión en que M_i deberá ser reevaluado y presentado en un nuevo proyecto.
- iii) H_i es el poder calorífico específico de cada componente i de material combustible (MJ/Kg).
- iv) A_f es el área de piso del almacén estudiado medido en m².

Se realizaron los cálculos para todos los escenarios estudiados y para ambas alternativas (pallet de madera o plástico). Los resultados obtenidos se muestran a continuación en la tabla 4.14.

Escenarios	Area (m ²)	Carga (MJ/m ²) madera	Carga (MJ/m ²) plástico	Altura (m)
Manual	4285	2705	2999	16,3
Manual en V	6353	1824	2023	16,3
Automatico 2 pasillos picking integrado	2152	5387	5972	30,8
Automatico 2 picking exterior	2832	4092	4537	28,9
Automático 1 pasillo	3045	3807	4221	30,8

Tabla 4.14: Resultados cargas térmicas para los distintos escenarios

Se observó que las cargas térmicas para todos los escenarios son mayores a 1200MJ/m^2 , por lo que según la norma el riesgo de incendio es alto, quedando de esta forma categorizados como locales industriales con altas cargas de fuego. Para este tipo de instalaciones las medidas que plantea la normativa uruguaya son las mostradas en la figura 4.8.

Clasificación por destino Grupo I - Industria Categoría I3 - Locales con alta carga de fuego					
Protección contra incendios	Clasificación en altura				
	$h \leq 6$	$6 < h \leq 12$	$12 < h \leq 23$	$23 < h \leq 30$	$30 < h$
Acceso de vehículos de emergencia a la edificación	X	X	X	X	X
Seguridad estructural contra incendios	X	X	X	X	X
Compartimentación horizontal	X (1)	X (1)	X (1)	X	X
Compartimentación vertical			X	X	X
Control de materiales y revestimientos	X	X	X	X	X
Salidas de emergencia	X	X	X	X	X
Plan de evacuación	X	X	X	X	X
Capacitación de incendio	X	X	X	X	X
Iluminación de emergencia	X	X	X	X	X
Detección de incendio	X	X	X	X	X
Alarma de incendio	X	X	X	X	X
Señalización de emergencia	X	X	X	X	X
Extintores	X	X	X	X	X
Bocas de incendio	X	X	X	X	X
Bocas de incendio exterior			X	X	X
Control de humo			X	X	X
Rociadores automáticos				X	X

Notas específicas

1- Puede ser sustituido por sistema de rociadores automáticos

Figura 4.8: Requerimientos normativa uruguaya

Siendo la altura de los escenarios manuales 16,5 metros y la de los escenarios automáticos 30,8 y 28,9 metros se observa que la única diferencia requerida por la legislación uruguaya es que para los escenarios automáticos se requerirá de forma obligatoria el uso de rociadores automáticos.

El punto en el que se hará mayor énfasis será la selección e instalación de los sistemas de rociadores, ya que estos eventualmente podrían modificar el layout del depósito. Vale la pena destacar que una alternativa a los rociadores no contemplada por la normativa es la inertización del ambiente de trabajo. Esto es, la reducción del nivel de oxígeno en el ambiente por medio de un sencillo sistema de ventilación. Debido a que no se encuentra regulado no se desarrollará más respecto a esta alternativa, pero vale la pena tenerla en mente dado que no solo es efectiva si no que es barata y de sencilla aplicación [46].

4.4.2 Rociadores

La norma NPFA 13 es una norma de estándares americanos que detalla la instalación de rociadores en los ámbitos de trabajo, estableciendo obligaciones y recomendaciones. La misma se adentra en profundidad en la temática, hablando como por ejemplo del caudal requerido dependiendo de la instalación, como de los distintos componentes que

debe tener el sistema y sus características y definiciones. El presente trabajo no pretende entrar en gran detalle en el diseño del sistema de rociadores, pero si se quiere definir correctamente la cantidad y distribución correcta ya que esto podría modificar las dimensiones globales para los distintos escenarios. Para lograr esto se siguieron una serie de lineamientos [47] expuestos en la norma:

- i) El área de cobertura, será el área “asignada” a ese aspersor para su protección. El área de protección de un rociador automático nunca puede superar los 36m².
- ii) Según la norma, debido a las alturas de almacenamiento de los distintos escenarios, estos se clasifican como “high piled storage”, sabiendo esto, y tomando el peor caso para la densidad de agua (para cubrirse, ya que como se dijo anteriormente, no se profundizará en estos temas) los aspersores deberán tener como máximo un área de cobertura de 9,6m² y una máxima distancia entre ellos de 3,7m.
- iii) La distancia entre aspersores se debe medir a lo largo de la inclinación del techo.
- iv) La distancia entre la pared y un aspersor nunca puede exceder la mitad de la distancia entre un aspersor y otro.
- v) El espacio entre el almacenamiento y los rociadores deberá ser un mínimo de 457mm.
- vi) Los rociadores deben estar entre sí, al menos a una distancia de 1,8 metros salvo para el caso de rociadores in-rack para los cuales se permitirán distancias menores.
- vii) Los rociadores in-rack deberán de ser colocados por lo menos a una distancia de 15,4cm del bulto en el rack y deberán estar a menos de 3,05 metros de distancia entre ellos (tanto en el plano vertical como el horizontal).

Vale la pena mencionar que el uso de rociadores in-rack se utilizó solamente para los escenarios automáticos debido a que los mismos por sus características estructurales se dificulta mucho el acceso en caso de una emergencia. Esto es debido a que tienen pasillos más angostos y alturas elevadas por lo que si eventualmente se quiere acceder con un equipo de bomberos la tarea se vería sumamente entorpecida. Debajo se muestran imágenes de ambos tipos de depósito para ilustrar esta situación.



Figura 4.9: Almacén manual



Figura 4.10: Almacén con transelevador automático

Otro motivo por el que se colocan es que debido a las grandes alturas que se manejan, si se pusieran solamente aspersores en el techo, el agua se evaporaría antes de llegar a los niveles inferiores. La norma recomienda instalar aspersores in-rack para almacenamientos superiores a 16 metros. Para la instalación de estos se tomaron otros dos lineamientos de la norma NFPA los cuales plantean que, para instalaciones que se requieran aspersores in-rack, el primer nivel se debe instalar como máximo a 6,10 metros del nivel del piso y luego cada nivel de aspersores deberá estar a menos de 3,05m del siguiente. Aquí hay que aclarar que la distancia del piso al primer nivel de aspersores in-rack se respetó, ya que se instalaron los aspersores a partir de la tercera posición de almacenamiento la cual se encuentra a 5,95 metros del piso (agregándole los 15,4 cm necesarios para la colocación del aspersor in rack).

Colocado el primer nivel de aspersores, los siguientes se colocarán cada dos posiciones de pallet, por lo que el patrón sería dos posiciones de pallet sin rociador in-rack y al siguiente nivel con rociadores in-rack. Esto va contra los lineamientos de la norma, pero se decidió hacerlo de esta por sugerencia y experiencia del tutor en este tema. Teniendo en cuenta todo lo anterior se calculó la cantidad de aspersores necesarios para cada escenario. Debajo se puede observar una figura con los resultados obtenidos y en el anexo electrónico³⁸ se deja un archivo de Excel con los cálculos realizados.

Escenario	Rociadores techo	Rociadores zonas auxiliares	Rociadores In-Rack	Rociadores totales
Escenario manual	494	30	0	524
Escenario manual en V	800	0	0	800
Escenario automático 2 pasillos picking integrado	160	30	512	702
Escenario automático 2 picking exterior	160	30	384	574
Escenario automático 1 pasillo	140	30	576	746

Tabla 4.15: Resumen cantidad de rociadores por layout

³⁸ Ver anexo electrónico, archivo de Excel: "Cálculos incendio"

Vale la pena aclarar que en la tabla anterior se muestra el número de rociadores calculados para las zonas auxiliares (staging y recepción). El dimensionamiento de las mismas se explica en el próximo capítulo.

5. Layouts

Esta sección del manuscrito está destinada a mostrar los layouts finalizados. Para esto lo primero que se mostrará serán los cálculos realizados para dimensionar la zona de staging, la zona de recepción y los muelles de carga. Luego se integrará todo esto con las cámaras de frío dimensionadas en el capítulo 3 y de esta forma se obtendrán los 5 escenarios finales para los cuales se estudiará la inversión y los costos asociados.

5.1 Dimensionamiento zonas auxiliares

5.1.1 Muelles para camiones

Para calcular el número de muelles de camiones, se utilizó la siguiente ecuación [48]:

$$N^{\circ} \text{ muelles} = \frac{NC * (T_{aprox} + T_{salida}) + NP * T_{pallet} + NPe * T_{adm}}{HT}$$

A continuación, se pasará a explicar que es y cómo se aproximó cada término de la ecuación:

- i) NC : es el número de camiones por día de trabajo. Para aproximarlo se tomó en cuenta el flujo de salida diario para los meses de mayor demanda (126 pallets). Luego se aproximó en pallets la capacidad de dos tipos de camiones utilizados para transporte de cargas y se obtuvo:
 - a. Camiones de 40m³: 11 camiones por día.
 - b. Camiones de 100m³: 5 camiones por día.
- ii) T_{aprox} : es el tiempo que el camión demora en entrar y colocarse de forma que pueda subir la carga. Se lo estimó en 3,5 minutos teniendo en cuenta que para dejarlo de la forma adecuada se requerirá maniobrar y luego empotrarlo con el muelle de salida para comenzar la carga de los pallets.
- iii) T_{salida} : se lo estimó en un 1 minuto ya que el camión se encontrará perfilado hacia la salida y lo único que se tiene que hacer es ser cerrado y retirarse.
- iv) NP : será el número de pallets que contendrá cada carga y dependerá del tipo de camión. Para los camiones de 40m³ se aproximó en 12 pallets por camión y para los de 100m³ en 26 pallets por camión. Estas estimaciones se hicieron teniendo en cuenta el tamaño de los camiones y el tamaño de cada pallet.
- v) NPe : es el número de pedidos por día y se supuso igual al número de camiones por día de trabajo.

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

- vi) T_{adm} : es el tiempo administrativo por pedido. Para estimarlo se asumió que el papeleo relativo al pickeo ya estará listo cuando el camión arribe. Lo único habría que hacer entonces, sería un rápido conteo y chequeo de pallets para confirmar la cantidad y firmar el despacho. Este tiempo se estimó en 5 minutos.
- vii) T_{pallet} : será el tiempo que se demora en mover el pallet de la zona de staging al camión. Las distancias no serán muy largas (como se verá más adelante en este capítulo). Teniendo en cuenta la velocidad del transpaleta, la recogida y dejada del mismo se aproximó 3 minutos.
- viii) Horas netas de trabajo al día: Esto ya se había definido anteriormente, siendo el turno de trabajo del depósito de 7,5 horas.

Vale la pena aclarar que los tiempos estimados anteriormente se hicieron en base a la experiencia cercana de los autores del proyecto dado que desarrollan su actividad laboral en las oficinas de un depósito.

Teniendo todos los parámetros, se procedió a calcular la cantidad de muelles para ambos tipos de camiones. Realizando estos cálculos, se obtiene que se necesitan 3 muelles.

5.2.2 Zona de staging y de recepción

En primer lugar, se definirán ambas zonas:

- i) Zona de recepción: es la zona donde descansa la mercadería que está esperando para entrar al depósito. También allí puede realizarse la revisión de la mercadería para comprobar que se encuentre en condiciones adecuadas. Los productos típicamente arriban en grandes unidades, como pallets por lo que el trabajo para ingresar la mercadería al almacenamiento no suele ser grande [22]. En el caso de estudio, la mercadería llega directamente del final de línea de producción, por lo que bastará con revisar el adecuado estado del bulto para ingresarlo.
- ii) Zona de staging: espacio destinado a los pedidos preparados hasta el momento de la carga de los mismos. En ella también se puede realizar controles para corroborar el correcto estado de la mercadería.

Definidas estas zonas, vale la pena aclarar que en el manual de gestión previamente citado para hallar los muelles de camiones también se encontraron fórmulas para dimensionar ambas áreas. Pero al querer aplicar las ecuaciones se encontró la dificultad de que en el texto no se explicitaba correctamente a que se referían algunos términos. Sin embargo al consultar con un profesional del área, explicó que el diseño de estas zonas suele hacerse de “adentro para afuera”. Esto es, preocuparse porque en esta zona quede espacio suficiente para almacenar una carga y poder transitar adecuadamente. Entonces lo que se hizo fue preocuparse por diseñar una zona de recepción y de staging que pudiera albergar de forma correcta una orden de 26 pallets (ya que flujo de entrada y salida deben de estar balanceados). Teniendo esto en cuenta y diseñándolo de manera armónica con las camarás de frío, se llegó a la conclusión de que la zona de staging requeriría de aproximadamente 200m² y la de recepción 150m². El área de recepción es un poco más pequeña ya que no es necesario que una orden completa se albergue ahí, pues el ingreso de la mercadería a la camará de frío podría hacerse de forma continua sin la necesidad de que los pallets se acumulen (ya que solo

se requiere de un procesamiento de la mercadería para darla de alta en el stock). En el caso de la zona de staging, la mercadería deberá esperar por el camión.

Definidas estas áreas, los muelles para los camiones y los cambios a tener en cuenta en las cámaras de frío dado por los distintos requerimientos de las instalación de incendios y de refrigeración, será pertinencia en lo que queda de este capítulo, mostrar los layouts de los distintos escenarios terminados, detallando las medidas finales y explicando aspectos que se crean relevantes mencionar.

5.3. Escenarios almacenes manuales

5.3.1 Escenario manual

A continuación se encontraran los planos para el layout del escenario manual.

Recuadrado en rojo se pueden observar las zonas de staging y recepción en la figura 5.1. Si se mira con atención se puede ver que dentro de ellas se encuentran los boxes de egreso e ingreso respectivamente. En la figura 5.4 se pueden observar. En la figura 5.2 circulado en amarillo se pueden ver representados los equipos de aire acondicionado. Los planos con sus medidas y en mayor detalle se adjuntan los archivos de autocad en el anexo electrónico. Adicionalmente, los planos se encuentran a continuación en las páginas 94 y 95.

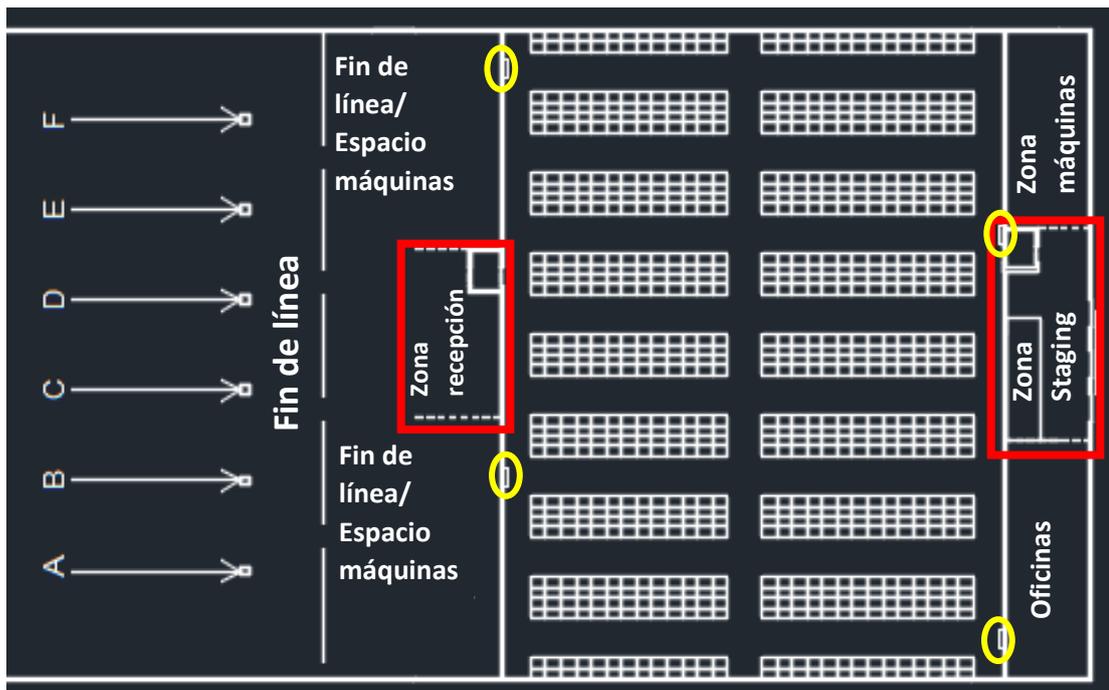


Figura 5.1: Corte en planta – Escenario manual

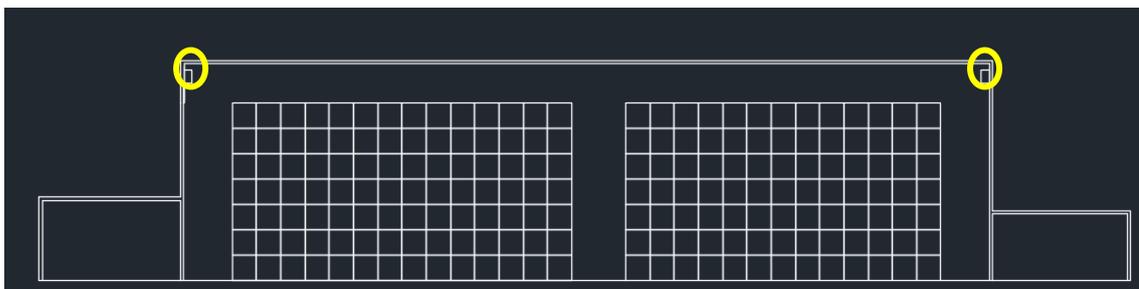


Figura 5.2: Corte transversal – Escenario manual H

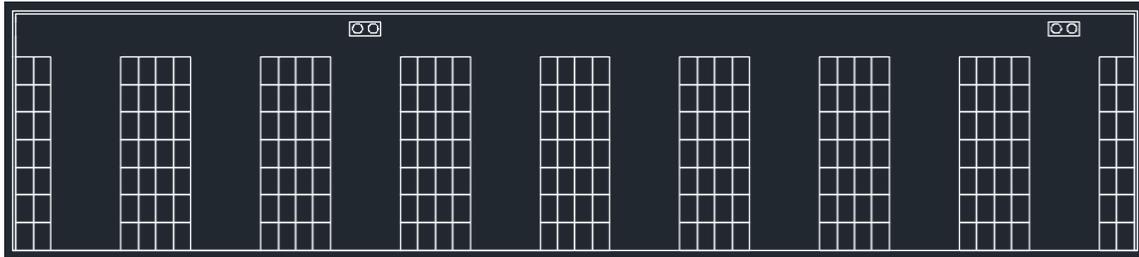


Figura 5.3: Corte lateral – Escenario manual

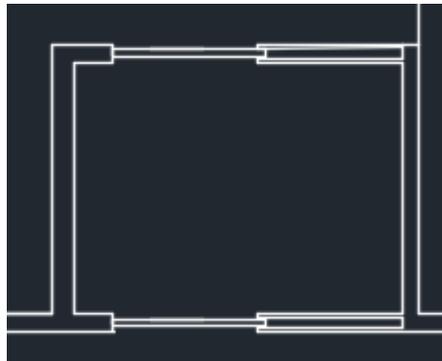


Figura 5.4.: Box de ingreso/egreso

5.3.1.1 Medidas finales

		Escenario manual	
Camara de frío	Altura(m)		16,5
	Largo (m)		59,8
	Ancho (m)		77,3
	Área (m ²)		4.623
	Volumen (m ³)		76.133
	Altura almacenamiento (posiciones de pallet)		7,0
Zona de staging	Largo (m)		25,1
	Ancho (m)		10,5
	Altura (m)		5,3
	Área (m ²)		263,4
	Volumen (m ³)		1.383
Zona de recepción	Largo (m)		20,1
	Ancho (m)		10,3
	Altura (m)		5,3
	Área (m ²)		205,9
	Volumen (m ³)		1.081
TOTAL	Área (m ²)		5.092
	Volumen (m ³)		78.597

Tabla 5.1: Medidas para escenario manual

5.3.1.2 Comentarios

Con respecto a este layout hay que aclarar que a pesar de que los cálculos para dimensionar la cámara de frío (realizados en el capítulo 3) fueron realizados basándose en un modelo en el cual se suponía que el largo del depósito equivaldría al largo de la estantería, para facilitar la operativa del mismo se decidió dividir en 2 las estanterías y hacer un layout tipo H. Lo que se hace es dejar un pasillo de 4 metros entre las dos mitades del depósito con el fin de facilitar los desplazamientos a lo largo del mismo. En la figura debajo se ilustra una comparación de los recorridos para extraer 1 pallet en posiciones equivalentes para un layout en H y uno como el que originalmente se había modelado (en I).

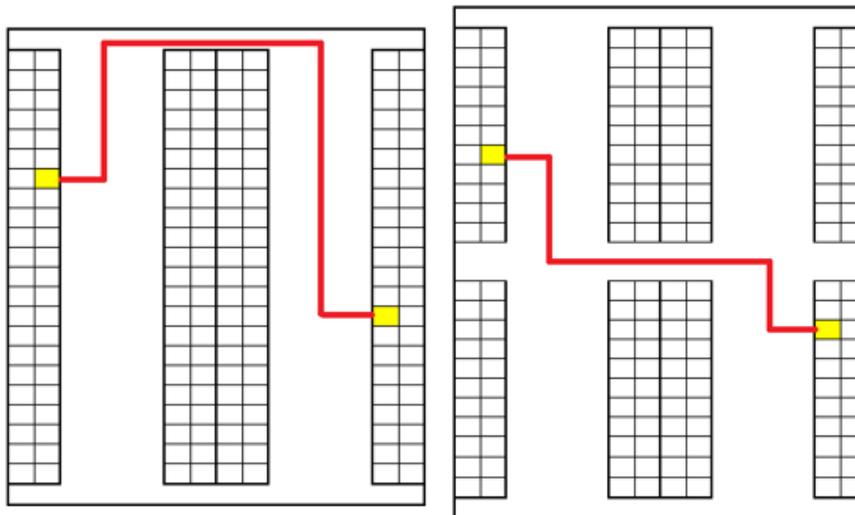


Figura 5.5: Comparación recorridos layout en H vs layout en I

Vale la pena aclarar que las medidas mostradas en la tabla 5.1 no tienen en cuenta zonas destinadas para máquinas u oficinas. Estas zonas se diagramaron únicamente para ilustrar como se aprovecharían estos espacios, y no son tenidas en cuenta para el posterior análisis de inversión y costos. También se puede observar que en los planos se representó el final de línea de producción (esto se hizo para todos los layouts).

Otro comentario que vale la pena hacer es que el ingreso y egreso de pallets a la cámara de frío siempre se da a través de boxes. Estos actúan como una esclusa, en la que el pallet ingresará en las condiciones de temperatura y humedad de la zona en donde se encontraba. Luego en el box de ingreso se lleva la carga a las condiciones de trabajo de la cámara de frío. Esto se hace para que el choque térmico sea menor y la eficiencia de la cámara de frío sea mayor.

PLANO VISTA ARRIBA LAYOYUT MANUAL

PLANO VISTAS LATERALES LAYOUT MANUAL

5.3.2 Escenario manual en V

Análogo a lo representado para los layouts manuales, se visualizan los boxes de egreso, e ingreso así como los equipos de aire acondicionado en las figuras 5.7, 5.8 y 5.9.

Los planos se pueden encontrar en el anexo electrónico y también se ilustrarán en las páginas 98 y 99.

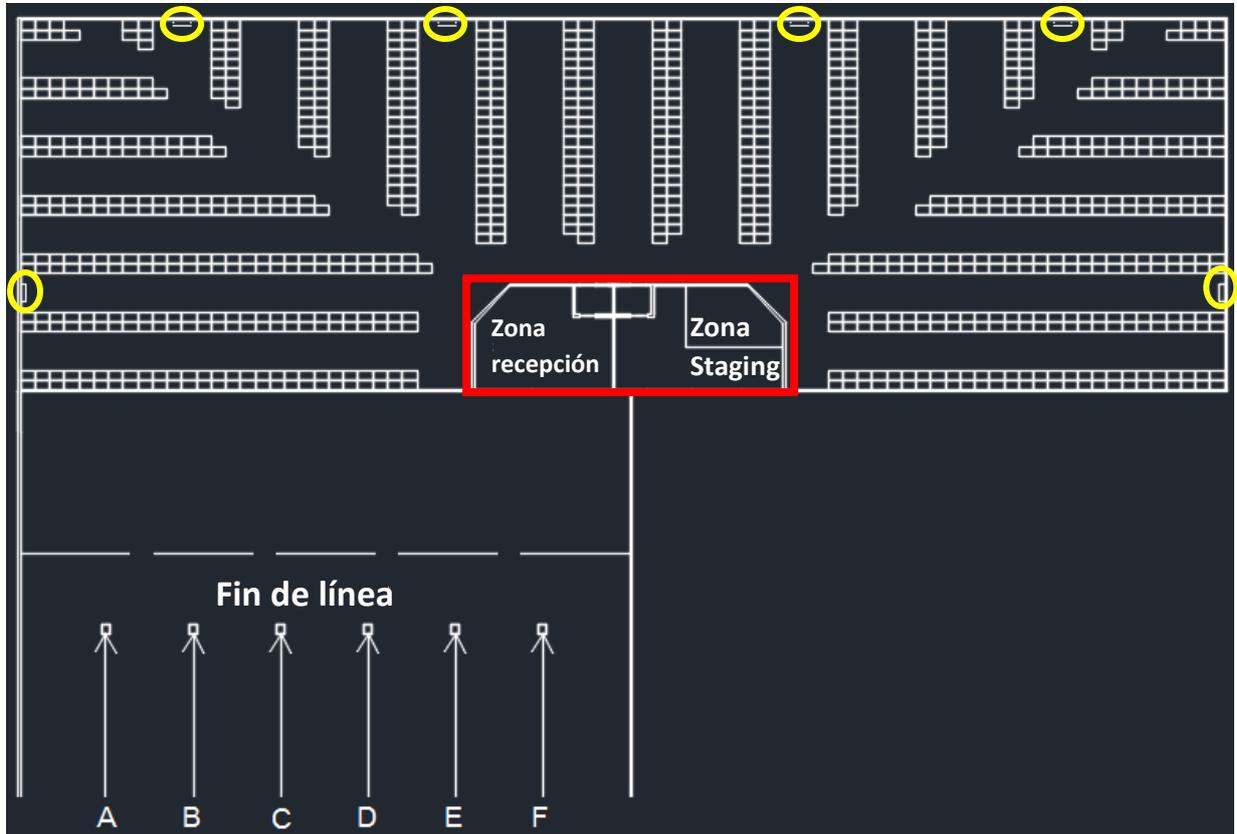


Figura 5.7: Corte en planta – Escenario manual en V

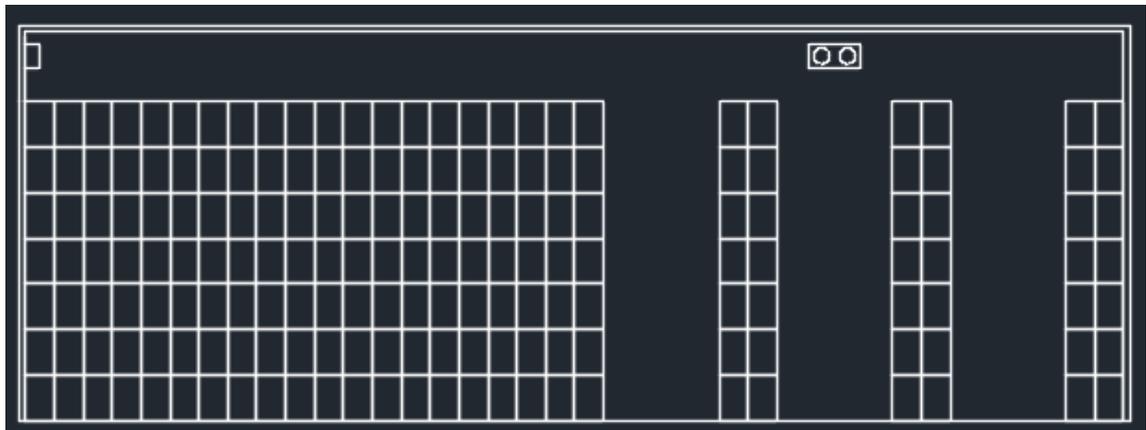


Figura 5.8: Corte transversal – Escenario manual en V

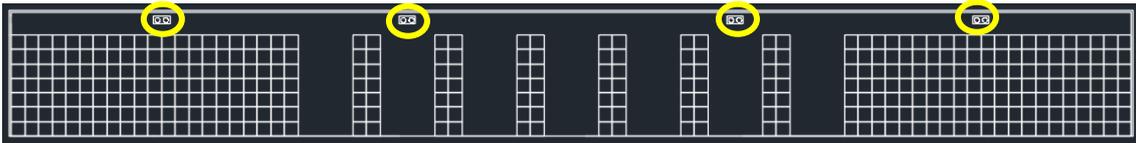


Figura 5.9: Corte frontal – Escenario manual en V

5.3.2.1 Medidas

A continuación en la figura 5.10 un resumen de las medidas para este escenario.

Escenario manual en V		
Camara de frío	Altura(m)	16,5
	Largo (m)	148,1
	Ancho (m)	46,1
	Área (m ²)	6.369
	Volumen (m ³)	104.891
	Altura almacenamiento (posiciones de pallet)	7,0
Zona de staging	Altura (m)	5,3
	Área (m ²)	253,6
	Volumen (m ³)	1.331
Zona de recepción	Altura (m)	5,3
	Área (m ²)	205,2
	Volumen (m ³)	1.077
TOTAL	Área (m ²)	6.827
	Volumen (m ³)	107.300

Tabla 5.2: Medidas para escenario manual en V

5.3.2.2 Comentarios

Como se comentó en el capítulo 3, gracias a la disposición elegida de las estanterías en este escenario, se pudo aprovechar el espacio para integrar las áreas de staging y recepción dentro del mismo. Como se observa en los planos, ambas zonas encuentran una al lado de la otra, ya que para este tipo de almacenes la entrada y la salida de mercadería se concentra en un único punto.

LAYOUT PLANO HORIZONTAL MANUAL EN V

LAYOUT PLANOS VERTICALES MANUAL EN V

5.4 Escenarios automáticos

Con respecto a estos escenarios, se decidió que la estructura de los mismos fuese autoportante. Esta ha sido la tendencia desde finales del siglo XX y principios del XXI en la industria para depósitos de estas características (de grandes dimensiones y robotizados). Este tipo de depósitos aprovechan toda la superficie y altura permitida con el propósito de maximizar la capacidad de almacenaje y mejorar el rendimiento de los movimientos logísticos. Al ocupar únicamente el espacio necesario, el coste energético para mantener la instalación a bajas temperaturas de forma constante es menor.

Las estructuras autoportantes son edificios integrales formados por estanterías metálicas sobre las que se fijan los paneles, los cerramientos verticales y la cubierta. Su construcción es distinta que la de las cámaras tradicionales, ya que se ejecuta en poco tiempo y con escasa obra civil.

En la construcción de estos depósitos deben cuidarse elementos de vital importancia, uno de estos es que la losa esté correctamente aislada y sea resistente a las grandes cargas dinámicas y estáticas a la que está sometida. También hay que prever la galería superior donde se colocan y mantienen los evaporadores, válvulas, tuberías y cables de las instalaciones frigoríficas, eléctricas y contra incendios.

A pesar de requerir estos cuidados, por todas sus ventajas es que se decide que los depósitos automáticos del presente trabajo este conformados por este tipo de estructura.

5.4.1 Layout de escenario automático 2 pasillos picking integrado

Análogo a los escenarios manuales, a continuación en las figuras 5.10, 5.11 y 5.12 pueden encontrarse el detalle para los box de ingreso/egreso, zonas auxiliares y aires acondicionado. Los planos pueden encontrarse en el anexo y también se encontrarán en las páginas 103 y 104.

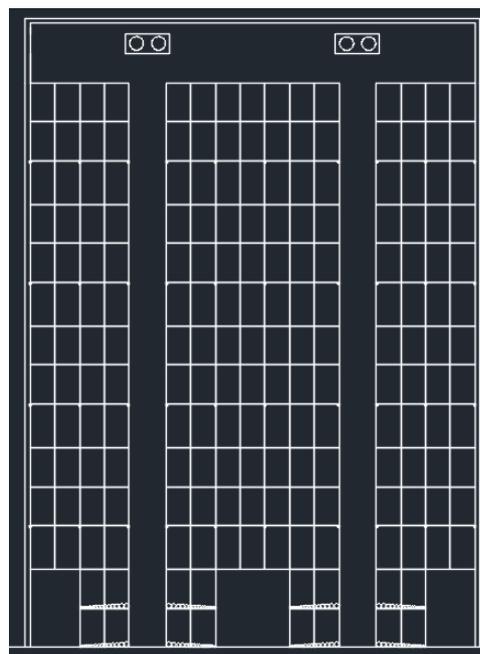


Figura 5.10: Corte frontal – Escenario automático 2 pasillos picking integrado

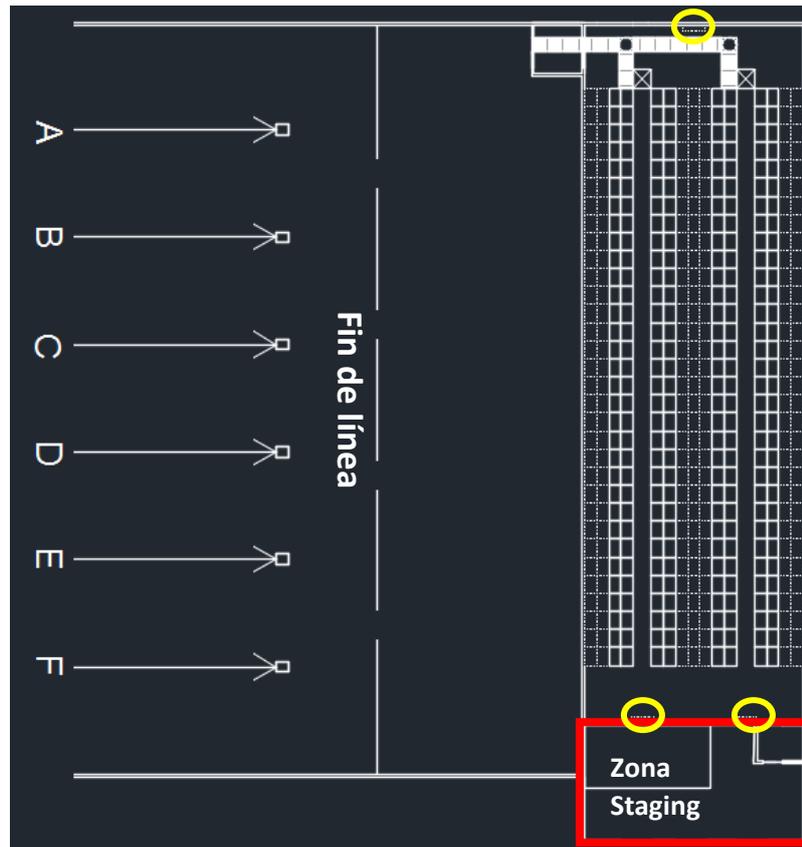


Figura 5.11: Vista en planta – Escenario automático 2 pasillos picking integrado

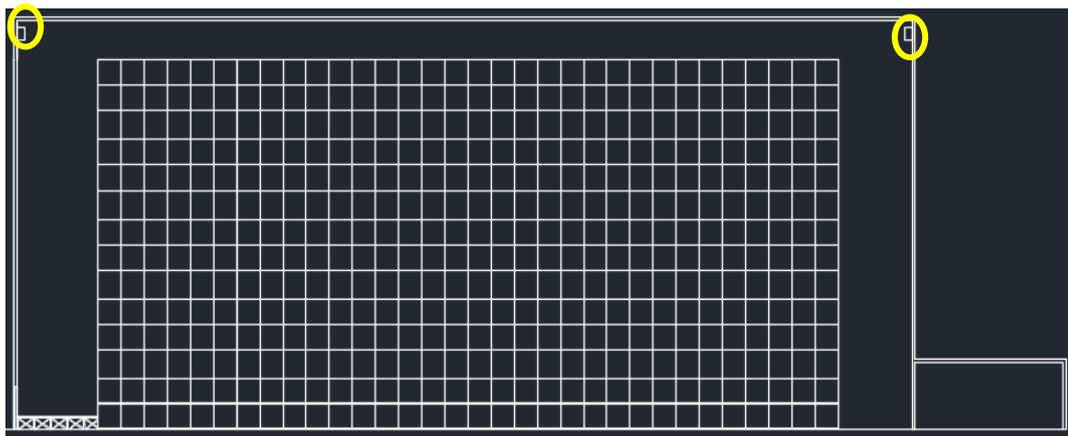


Figura 5.13: Corte transversal – Escenario automático 2 pasillos picking

5.4.1.1 Medidas

A continuación en la tabla 5.3 se exponen las medidas para este escenario.

Escenario automático 2 pasillos picking integrado		
Camara de frío	Altura(m)	30,8
	Largo (m)	69,9
	Ancho (m)	22,1
	Área (m ²)	2.152
	Volumen (m ³)	47.550
	Altura almacenamiento (posiciones de pallet)	14,0
Zona de staging	Largo (m)	12,0
	Ancho (m)	22,1
	Altura (m)	5,3
	Área (m ²)	265,2
	Volumen (m ³)	1.392
TOTAL	Área (m ²)	2.417
	Volumen (m ³)	48.943

Tabla 5.3: Medidas para escenario automático 2 pasillos picking integrado

5.4.1.2 Comentarios

Con respecto a este layout vale la pena comentar que por el pasillo del centro se podrá realizar picking y circular en ambos sentidos mientras que para los pasillos colocados contra la pared la circulación deberá ser de un solo sentido debido a su ancho, teniendo en cuenta la maquinaria utilizada[49]. Vale la pena aclarar que en este layout como en todos los automáticos no se tendrá área de recepción ya que los AGV realizarán la tarea de llevar el pallet armado hacia la cinta transportadora del box de ingreso.

Otro comentario que vale la pena realizar es que si se observa el corte frontal se puede ver como los dos primeros niveles de estantería (destinados a picking) contienen rack dinámicos. Esto se hace para que el transelevador coloque el pallet en la zona de picking y el mismo caiga por acción de la gravedad hacia el pasillo del túnel de picking. Por último, si se observa este mismo corte, se pueden apreciar los aspersores in-rack y como las posiciones de estantería que los contienen son de mayor altura que el resto. En la figura 5.13 y 5.14 se ilustran estos detalles.

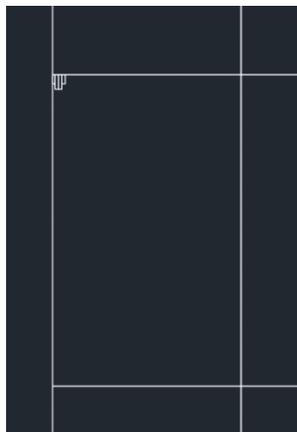


Figura 13.: Posición de rociador in-Rack en posición de pallet

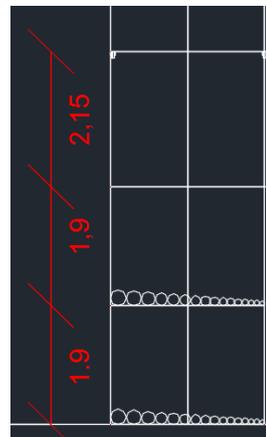


Figura 14.: Posición de pallet con estantería dinámica

PLANO HORIZONTAL MODELO 2 PASILLOS PICKING INTEGRADO

PLANOS VERTICALES DOS PASILLOS PICKING INTEGRADO

5.4.2 Escenario automático 1 pasillo

A continuación se encuentran en las figuras 5.15, 5.16 y 5.17 los detalles sobre zonas auxiliares, aspersores y aires acondicionados para este escenario. El detalle de los planes podrá encontrarse en el anexo electrónico y también a continuación en las páginas 107 y 108.

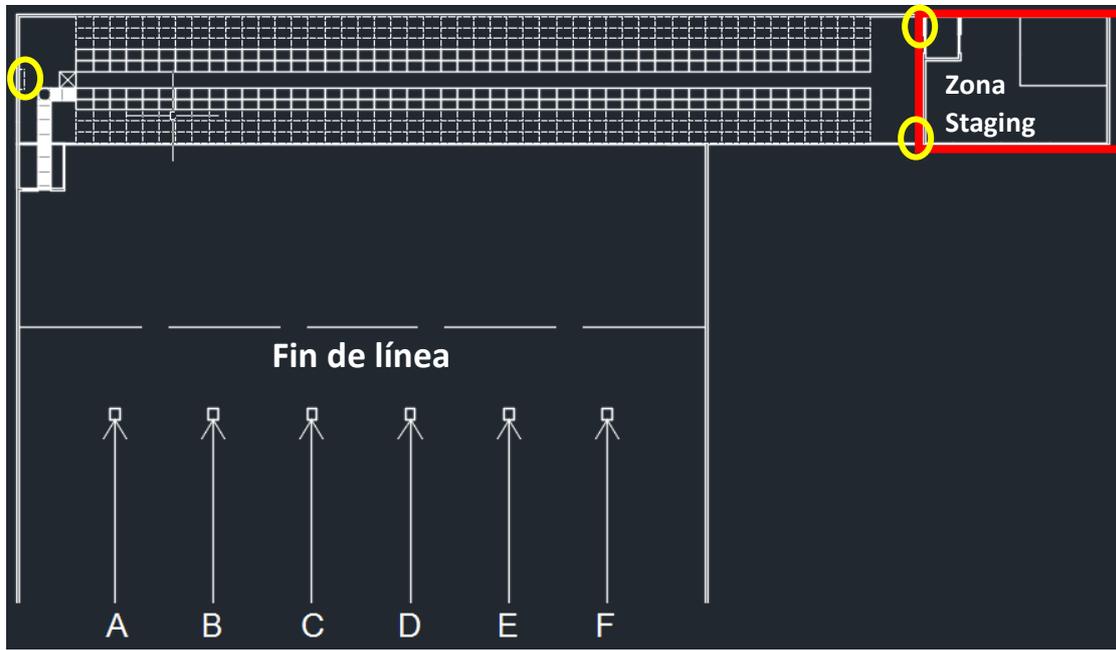


Figura 5.15: Vista en planta – Escenario automático 1 pasillo

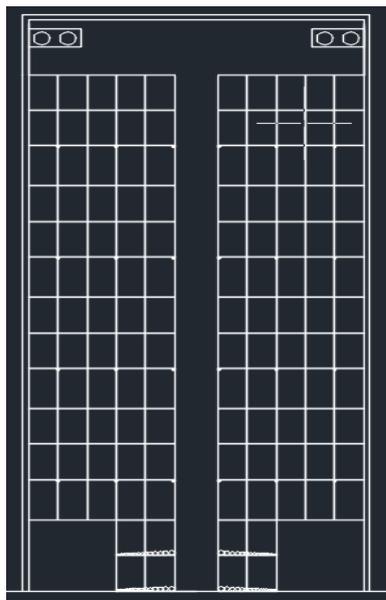


Figura 5.16: Corte frontal
Escenario automático 1 pasillo

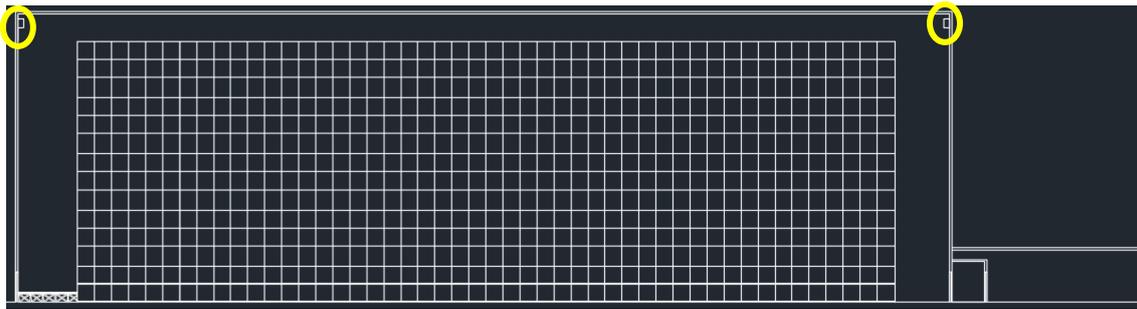


Figura 5.17: Corte transversal – Escenario automático 1 pasillo

5.4.2.1 Medidas

A continuación en la tabla 5.4 se encuentran las medidas para este escenario.

Escenario automático 1 pasillo		
Cámara de frío	Altura(m)	30,8
	Largo (m)	98,9
	Ancho (m)	14,3
	Área (m ²)	3.045
	Volumen (m ³)	43.537
	Altura almacenamiento (posiciones de pallet)	14,0
Zona de staging	Largo (m)	20,3
	Ancho (m)	14,3
	Altura (m)	5,8
	Área (m ²)	289,6
	Volumen (m ³)	1.665
TOTAL	Área (m ²)	3.334
	Volumen (m ³)	45.202

Tabla 5.4: Medidas para escenario automático 1 pasillo

5.4.2.2 Comentarios

Para este escenario, será posible circular por los túneles de picking en ambos sentidos sin estorbarse. Al igual que escenario automático anterior este almacén cuenta con rociadores in-rack y las estaterías de los niveles de picking tienen racks dinámicos.

PLANO HORIZONTAL ESCENARIO 1 PASILLO

PLANOS VERTICLAES ESCENARIO 1 PASILLO

2.4.2 Escenario automático 2 pasillos picking exterior

Finalmente, a continuación en las figuras 5.18, 5.19 y 5.20 se encuentran los detalles de zonas auxiliares, aires acondicionados y aspersores para este escenario. El detalle de estos planos se puede ver en el anexo electrónico y también se encuentran representados en las páginas 112 y 113.

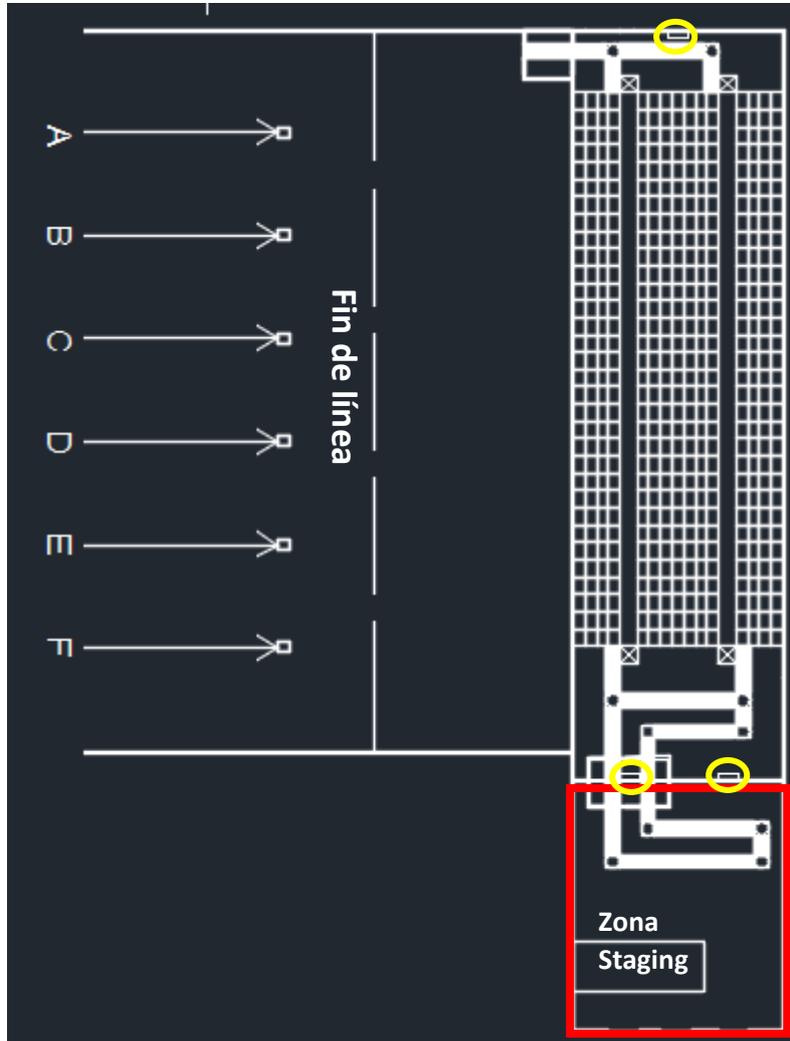


Figura 5.18: Vista de planta – Escenario automático 2 pasillos picking exterior

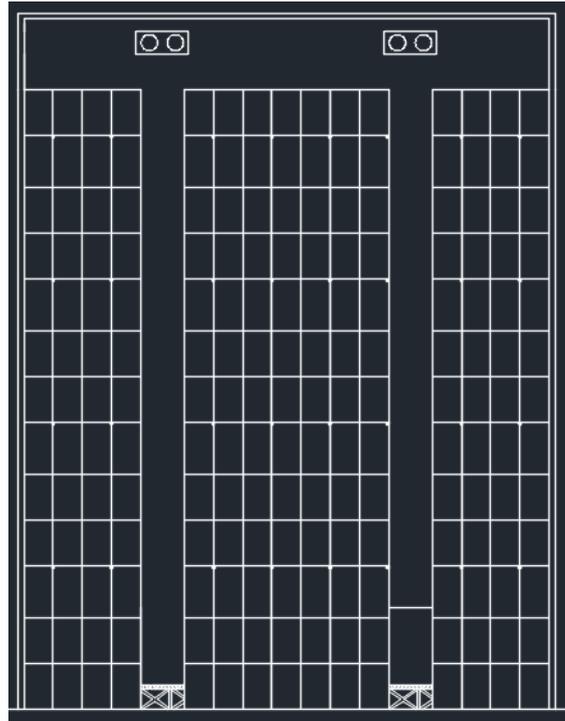


Figura 5.19 Corte frontal - Escenario automático 2 pasillos picking exterior

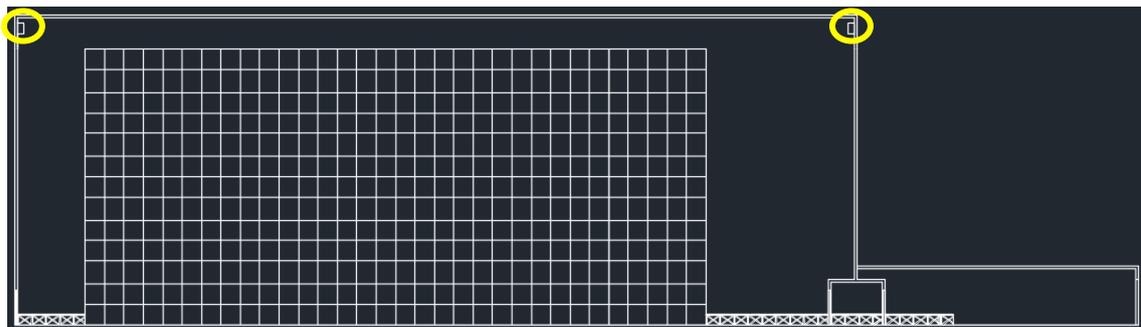


Figura 5.20: Corte transversal - Escenario automático 2 pasillos picking exterior

5.4.2.1 Medidas

A continuación en la tabla 5.5 se exponen las medidas para este escenario.

Escenario automático 2 pasillos picking exterior		
Cámara de frío	Altura(m)	28,9
	Largo (m)	77,9
	Ancho (m)	22,1
	Área (m ²)	2.251
	Volumen (m ³)	49.737
	Altura almacenamiento (posiciones de pallet)	13,0
Zona de staging	Largo (m)	26,3
	Ancho (m)	22,1
	Altura (m)	5,5
	Área (m ²)	581,9
	Volumen (m ³)	3.200
TOTAL	Área (m ²)	2.832
	Volumen (m ³)	52.937

Tabla 5.5: Dimensionado escenario automático 2 pasillos picking exterior

5.4.2.2 Comentarios

Observando el layout se puede ver que la particularidad de este diseño es que el picking no se dará en el interior de la cámara de frío, si no que el transelevador depositará el pallet en una cinta transportadora que lo lleva a la zona de staging. Extraída la mercadería necesaria del pallet, este seguirá el circuito por la cinta y será ingresado nuevamente a la cámara de frío. Esta configuración, permite que cada producto pueda ser extraído y reingresado a cualquiera de los dos pasillos de transelevador.

PLANO HORIZONTAL AUTOMATICO 2 PASILLOS PICKING EXTERIOR

PLANOS VERTICALES ESCENARIO 2 PASILLOS PICKING EXTERIOR

6. Inversión y costos operativos

6.1 Introducción

Con los capítulos anteriores, quedaron definidos los 5 escenarios de estudio, con todos sus equipos, maquinarias, estructuras, dimensiones y particularidades. Lo que se hará en este capítulo, será calcular la inversión de cada uno de los escenarios y sus costos operativos.

Para estimar los costos e inversiones involucradas (tanto de maquinaria, infraestructura, mano de obra y el resto de los elementos que el diseño implica) se consultó a diferentes fuentes, que se irán aclarando a medida que el capítulo avance. Algunos ejemplos de estas fuentes son catálogos nacionales y de otras regiones, páginas de compra por internet, bibliografía, experiencia de profesionales entre otras.

6.2 Inversión

Para estimar la inversión se comenzó por realizar una clasificación en 6 categorías: infraestructura y obra civil, maquinaria, refrigeración, incendio, otros e imprevistos.

A continuación, se abordarán una a una las categorías.

i) Infraestructura y obra civil

La tabla 6.1 muestra todos los aspectos que se tuvieron en cuenta en este grupo y la unidad en la que se considerará el elemento, es decir la unidad por la que se especifica el costo unitario. Adicionalmente está el costo unitario. A modo de aclarar la primera línea indica que el elemento es "Panel sándwich paredes", se considerará por m², y el costo unitario es de 120 USD, es decir 120 USD por m². La última columna indicara la fuente de donde se obtuvo la información.

Infraestructura y obra civil	Unidad de venta	Costo unitario	Moneda	Fuente
Panel sandwich	m ²	120	USD	[50] Profesionales del área
Panel sandwich techo	m ²	150	USD	[50] Profesionales del área
Box de ingreso	Unidad	15.334	USD	[50] Profesionales del área
Box de egreso	Unidad	15.334	USD	[50] Profesionales del área
Obra civil zonas auxiliares	m ²	400	USD	Profesionales del área
Piso aislante	m ²	850	USD	Profesionales del área
Piso aislante autoportante	m ²	1.000	USD	Profesionales del área
Piso exterior	m ²	550	USD	Profesionales del área
Ingeniería en detalle y dirección de obra	% costo total	3%	USD	Profesionales del área

Tabla 6.1: Montos unitarios infraestructura y obra civil

El costo por m² de los paneles sándwich para paredes y techo se averiguó de proveedores locales [50], internacionales y se presupuestó con un proveedor local. Se colocó un costo promedio. Por las características del techo (mayor exposición al sol, ángulo de exposición entre otros) el costo es un poco más elevado.

Para los box de ingreso y egreso, se utilizaron las medidas definidas en el capítulo anterior y se hizo un cálculo directo con los m². Adicionalmente se le sumo el costo de las puertas de ingreso y egreso, los cuales fueron brindados por un proveedor brasilero [51]. En la figura 6.1 se observa este tipo de puerta automática. Este modelo ayuda a disminuir las pérdidas por aberturas, esto lo hace más seguro, eficiente y se traduce en un ahorro en costos. Los boxes de ingreso son fundamentales, evitan el choque térmico entre el exterior, y para los escenarios automáticos sirven de celda de inspección del pallet (es decir se acepta si el pallet está en condiciones y se rechaza si no). Adicionalmente este box cuenta con deshumidificadores que ayudan a obtener la humedad deseada en el interior de la cámara.



Figura 6.1: Puerta automática

Los cálculos exactos de estos boxes se encuentran en el anexo electrónico³⁹.

Para la obra civil de zonas auxiliares se tomó un costo de 400 USD por m². En cuanto a los pisos, se hizo distinción entre 3 tipos: exteriores, pisos de la cámara caso manual y piso de la cámara caso automático. Para los exteriores se tomaron 500 USD. Para los pisos internos a la cámara, se distinguieron entre dos casos debido a que se decidió para el caso del modelo automático, como ya se comentó, una estructura autoportante. Esto tiene como consecuencia que los pisos tienen que soportar gran parte de la estructura civil y por este motivo el m² es más costoso. El costo utilizado para todo lo mencionado en este párrafo se obtuvo a partir consultas a profesionales del área constructora combinado con alternativas encontradas en internet.

Finalmente, se estimó un porcentaje de 3% del total de infraestructura. Esto se decidió de esta forma basándose en la experiencia de los profesionales que nos brindaron los costos relacionados a la construcción.

ii) Maquinaria

Análogamente al caso anterior, la tabla 6.2 a continuación muestra los puntos tenidos en cuenta en esta sección junto con su unidad, costo unitario, moneda y fuente.

³⁹ Anexo electrónico, archivo: "Inversión y costo operativo", pestaña: "Cálculos auxiliares"

Maquinaria	Unidad	Costo unitario	Moneda	Fuente
Almacén automático (estantería, transelevador, software informático, etc)	Posición de pallet	755	USD	Profesionales del área
Estanterías selectivas	Posición de pallet	120	USD	Profesionales del área
Estanterías flow rack	Posición de pallet	300	USD	Profesionales del área
Transpaleta manual	Unidad	2.000	USD	[52] [53] [54]
Pallets	Unidad	28	USD	[55]
Palets de mejor calidad	Unidad	17	USD	[55]
Transportadores	m	1.500	USD	Profesionales del área
AGV	Unidad	130.000	USD	[56] [57]

Tabla 6.2: Montos unitarios maquinaria

El primer costo de la tabla 6.2 es un costo por posición de pallet para los escenarios automáticos. Este costo incluye por posición, la adquisición de dos transelevadores, la estantería, el software informático y la instalación. El mismo fue obtenido directamente de profesionales del área en base a su experiencia con proyectos de porte parecido. Por lo general, el costo es integral (estantería, software, transelevador, etc.) ya que las empresas que proporcionan este servicio brindan un servicio integral.

Para las estanterías selectivas, en el caso de los escenarios manuales, se utilizó un costo estándar de 120 USD. Para las estanterías flow rack se utilizó un costo unitario de 300 USD. Ambos costos incluyen la instalación de las mismas. Los costos de las estanterías fueron obtenidos por consulta a profesionales involucrados en proyectos de instalación de almacenes, así como a empresas que hayan atravesado por proyectos similares en el último año.

El costo de los pallets de los modelos automáticos es más costoso ya que se exige una calidad mayor. Esto es debido a que tienen que estar en excelente estado para ser aceptados en la celda de inspección ya que, si el pallet está roto, torcido, maltratado, etc., puede generar problemas en el automatismo. Los costos de los pallets se obtuvieron de proveedores [55].

El costo de las transpaletas manuales y de los AGV se obtuvo luego de investigar en el mercado, buscando un precio promedio entre las opciones disponibles. El costo es unitario y la cantidad requerida dependerá de cada modelo.

Finalmente, el costo de las cintas transportadoras, se obtuvo por metro de cinta mediante consultas con profesionales con expertise en el área. Es un elemento costoso y que requiere mantenimiento frecuente.

iii) Refrigeración, sistema anti-incendio e instalación eléctrica

Finalmente se exponen los costos de inversión faltantes considerados en la tabla 6.3.

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

Concepto	Unidad	Costo unitario	Moneda	Fuente
Equipo refrigeración	m2	5.000	USD	Profesionales del área
Sistema anti incendio	Posición de pallet	80	USD	Profesionales del área
Instalación eléctrica	Posición de pallet	35	USD	Profesionales del área

Tabla 6.3: Costo unitario inversión refrigeración, incendio e instalación eléctrica

Para el equipo de refrigeración, se hicieron algunos cálculos primarios teniendo en cuenta los diferentes equipos a adquirir. Estos cálculos pueden encontrarse en el anexo electrónico. Como consecuencia de que el diseño del sistema de refrigeración, que involucra cañerías, sala de máquinas, etc. no formaba parte del énfasis del proyecto, se decidió poder estimar un costo por m² de la sala de máquinas. Este costo, se obtuvo consultando a diferentes profesionales con experiencia en cámara industriales de gran porte. El detalle se encuentra en el anexo electrónico.

Para el sistema de incendios se tomó un costo estimado por m². Se realizaron pequeñas variaciones dependiendo del modelo, pero estas modificaciones no tienen un impacto significativo en la inversión total. Todo esto se podrá encontrar en el anexo electrónico. Análogo para la instalación eléctrica. Para la obtención de estos costos, se tuvo acceso al detalle de un presupuesto de un proyecto de una industria nacional en el rubro de la refrigeración, del cual se extrajo información y se adaptó a las características del caso de estudio del presente trabajo.

Por recomendación de todos los profesionales consultados se estima un 10% del total para imprevistos.

Una vez obtenidos los costos unitarios de la inversión, se deberán aplicar estos costos a cada escenario. Los costos que tienen como unidad m², m y posiciones de pallets tienen su cantidad por escenario definida en los capítulos anteriores. Lo que resta definir, y requerirá un análisis extra, es la cantidad de maquinaria (AGV y transpaletas manuales) para cada escenario. Junto con este análisis se calculará cuanto personal es necesario, ya que ambos conceptos están ligados. Este análisis de tiempo en detalle se puede encontrar en el anexo electrónico⁴⁰. A continuación, en la tabla 6.4 y 6.5 se muestra un resumen de las conclusiones de estos análisis. Estos valores serán utilizados para el cálculo de la inversión y del costo operativo.

Maquinaria necesaria					
Escenarios	Ingreso	Movimientos internos	Egreso	Total transpaletas	Total AGVs
Manual	2	2	6	10	0
Manual en V	2	2	6	10	0
Automático 1 pasillo	2	0	6	6	2
Automático 2 pasillos picking integrado	2	0	6	6	2
Automático 2 pasillos picking exterior	2	0	3	2	2

Tabla 6.4: Maquinaria necesaria por escenario

⁴⁰ Archivo "Análisis de tiempos para cálculo de maquinaria y personal"

Personal total necesario para operaciones				
Escenarios	Ingreso	Movimientos internos	Egreso	Total
Manual	1	5	7	10
Manual en V	1	5	7	10
Automático 1 pasillo	0	0	7	6
Automático 2 pasillos picking integrado	0	0	7	6
Automático 2 pasillos picking exterior	0	0	3	2

Tabla 6.5: Mano de obra necesaria por escenario

Con los valores de la figura 6.4 más los valores ya obtenidos en capítulos anteriores se procedió a hacer los cálculos de inversión. El detalle de los mismos se podrá ver en el anexo electrónico. A continuación, un resumen de los montos de inversión en USD por escenario. Al final del capítulo se realizará un análisis de los mismos.

Escenarios	Inversión (millones de USD)
Manual	8
Manual en V	12
Automático 1 pasillo	10
Automático 2 pasillos con picking integrado	10
Automático 2 pasillos picking exterior	10

Tabla 6.6: Resumen inversión por escenario

6.3 Costos operativos

Para realizar el cálculo de los costos operativos, se hizo una clasificación en 4 grandes áreas: mano de obra, energía eléctrica y mantenimiento. Muchos de los costos operativos quedaron por fuera de este análisis debido a que se dio prioridad a los costos que pudieran presentar variaciones entre un escenario y otro.

i) Mano de obra

A continuación, en la tabla 6.7 se muestran los diferentes costos de mano de obra considerado. Este valor hora es el costo total que a la empresa le cuesta tener a la persona trabajando, es decir incluye los aportes patronales.

Tipo de personal	Unidad	Costo	Moneda	Fuente
Operario depósito	Hora	375	UYU	Experiencia personal de autores Consulta a profesionales del área
Jefe de distribución y almacenamiento	Hora	140	UYU	Experiencia personal de autores Consulta a profesionales del área
Gerente de supply	Hora	2400	UYU	Experiencia personal de autores Consulta a profesionales del área
Auxiliar de logística	Hora	520	UYU	Experiencia personal de autores Consulta a profesionales del área
Personal limpieza	Hora	250	UYU	Página BPS Consulta a profesionales del área

Tabla 6.7: Detalle costo mano de obra

Los valores fueron estimados realizando un promedio en base a una investigación que incluyó, estudio del mercado, estudio de los sueldos mínimos en la página de BPS [58], experiencia personal de los que escriben y consulta a profesionales.

ii) Energía eléctrica

A continuación, en la tabla 6.8 los costos de energía eléctrica considerados.

Consumo eléctrico	Unidad	Costo	Moneda	Fuente
Cargo fijo UTE	Mes	12.381	UYU	UTE
Consumo eléctrico	kW/h	3	UYU	UTE

Tabla 6.8: Detalle costo electricidad

Los costos se obtuvieron directamente de UTE [59]. Se seleccionó la tarifa que se consideró más conveniente para la potencia necesaria. Se muestra en la figura 6.2 la elección.

Se utilizó como costo estándar para hacer las cuentas el costo en horario llano, debido a que este horario tiene en total 13 horas, y se planificará de tal forma de trabajar con las máquinas en este horario.

1. Cargos por consumo de energía, por potencia y cargo fijo.

Tarifa	Nivel de tensión kV	Precio de energía \$/kWh			Potencia máxima medida \$/kW				Cargo Fijo mensual \$
		Valle	Llano	Punta	Valle	Llano	Punta	Punta-Llano	
GC1	0,230 - 0,400	1,791	3,235	9,732	-	-	-	424,8	12.381
GC2	6,4 - 15 - 22	1,765	3,049	7,840	-	-	-	274,8	12.381
GC3	31,5	1,745	3,005	5,930	24,5	90,9	150,1	-	12.381
GC4	63	1,745	3,005	5,358	24,5	66,4	104,6	-	12.381
GC5 *	110 - 150	1,720	2,905	4,832	21,0	66,0	87,0	-	12.381

* La tarifa GC5 es aplicable exclusivamente a servicios cuyos titulares hayan contratado con anterioridad a la aprobación de los decretos 276/002; 277/002 y 360/002.

2. Períodos horarios.

Los cargos por energía se distribuyen en tres períodos horarios, durante todos los días que integran la factura mensual, de acuerdo al siguiente detalle.

- horas Punta: de 18:00 a 22:00 hrs.
- horas Llano: de 07:00 a 18:00 y de 22:00 a 24:00 hrs.
- horas Valle: de 00:00 a 07:00 hrs.

Figura 6.2: Tarifa UTE grandes consumidores

iii) Mantenimiento

El mantenimiento se tomó como un porcentaje del total de la inversión de la maquinaria. Se eligió un 1,5% anual. Esta decisión se basó en consultas de profesionales del área. El personal necesario para la sala de máquinas está incluido en este porcentaje.

Luego de identificados los costos unitarios por elemento, resta decidir la cantidad de recursos necesarios por elemento. Para la mano de obra, la cantidad de operarios, están representados en la tabla 6.5. Para el resto de los empleados se tomó la siguiente distribución representada en la figura 6.9.

Escenario	Operario depósito	Jefe de distribución y almacenamiento	Gerente de supply	Auxiliar de logística	Personal de limpieza
Manual	10	1	1	1	2
Manual en V	10	1	1	1	2
Automático 1 pasillo	6	1	1	1	1
Automático 2 pasillos picking integrado	6	1	1	1	1
Automático 2 pasillos picking exterior	2	1	1	1	1

Tabla 6.9: Detalle cantidad de empleados por escenario

Se tomó más personal de limpieza para los escenarios manuales respecto a los escenarios automáticos ya que las superficies de los primeros son mayores. La parte administrativa y de gestión (jefes, gerentes y auxiliares) no cambia según el escenario. Estos números de personal fueron estimaciones basadas en la experiencia personal de los autores combinado con consultas a profesionales del área.

Para los cálculos de electricidad relacionados a la refrigeración, los números se desprenden de la carga térmica calculada en el capítulo refrigeración.

Los cálculos de luminaria se encuentran en el anexo electrónico, junto con el resto de los cálculos de este capítulo. Nos parece interesante mencionar el ahorro de costos en luminaria para el depósito automático con picking exterior. Al no tener personal dentro de la cámara, puede funcionar completamente a oscuras. Adicionalmente en un nivel inferior de ahorro frente a los escenarios manuales, los escenarios automáticos con picking integrado solo necesitan iluminación en pasillos de picking.

Debajo un resumen de los costos operativos por escenario en la tabla 6.10.

Escenarios	Costo operativo (USD/mes)
Manual	44.608
Manual en V	48.427
Automático 1 pasillo	43.975
Automático 2 pasillos con picking integrado	43.511
Automático 2 pasillos picking exterior	42.388

Tabla 6.10: Resumen costos operativos por escenario

6.4 Conclusiones costos e inversión

En la figura 6.3, se graficaron los montos de inversión por escenario.

Se desprende rápidamente del análisis, que el modelo en V es el que requiere la máxima inversión teniendo un pico en casi 12 millones de dólares. Luego, se puede concluir que el escenario manual es el que requiere la menor inversión. Los escenarios automáticos, presentando mínimas diferencias entre ellos, estarían ubicados en una inversión media. La inversión de los escenarios automáticos representa un 20% más que la inversión del escenario manual.

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

Dicho esto, se decidió profundizar en cómo están compuestas estas inversiones.

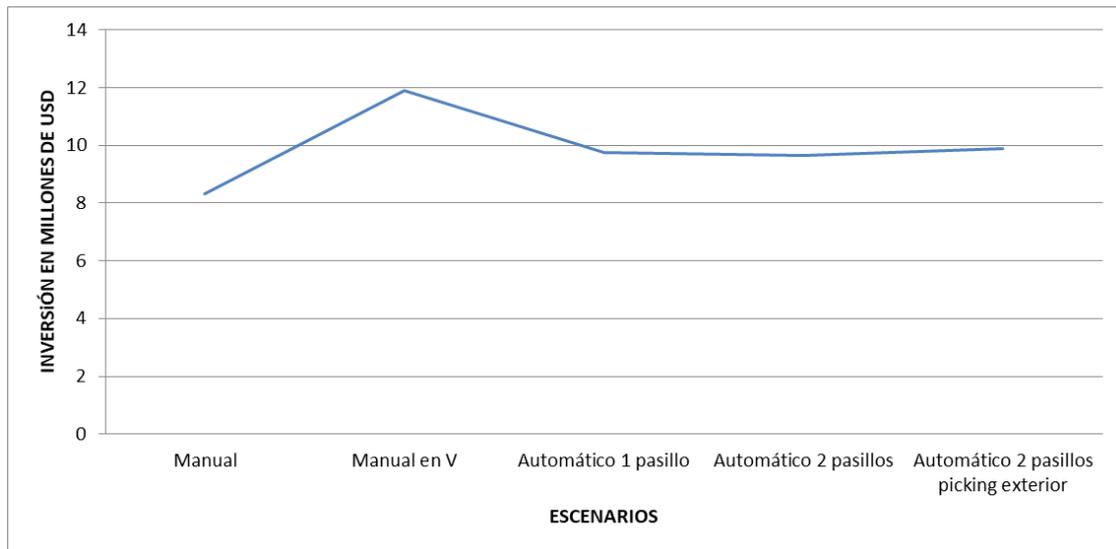


Figura 6.3: Inversión por escenarios

En la figura 6.4 se ven los diferentes rubros de inversión por escenario manual y en la figura 6.5 se ven los diferentes rubros de inversión por escenario automático. Si se compara la inversión de los escenarios manuales con los escenarios automáticos se observa que hay dos elementos que se invierten. En los escenarios manuales, el elemento principal de la inversión es el de infraestructura y obra civil, mientras que en los costos automáticos el elemento principal de la inversión es el de maquinaria.

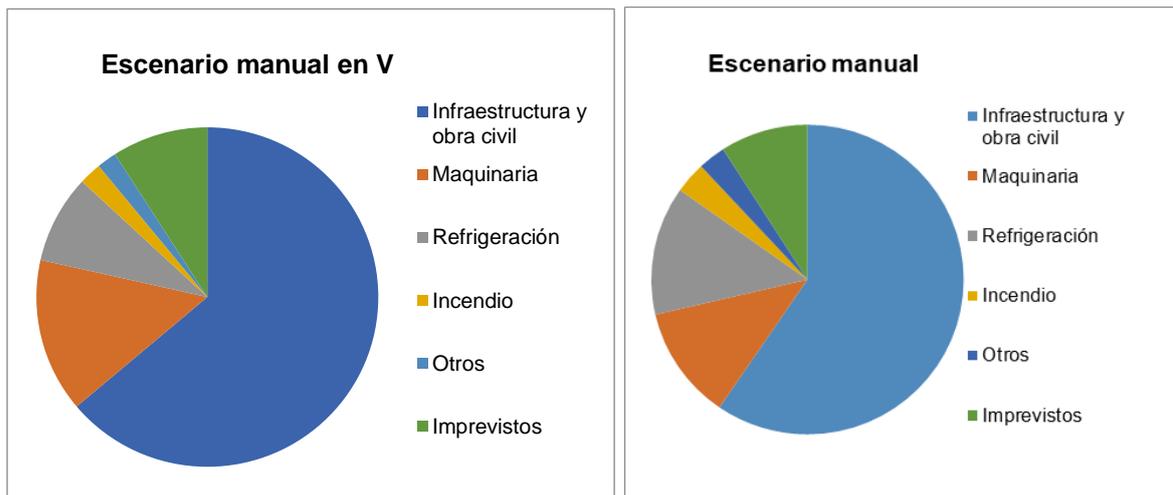


Figura 6.4: Inversión por categoría para escenarios manuales

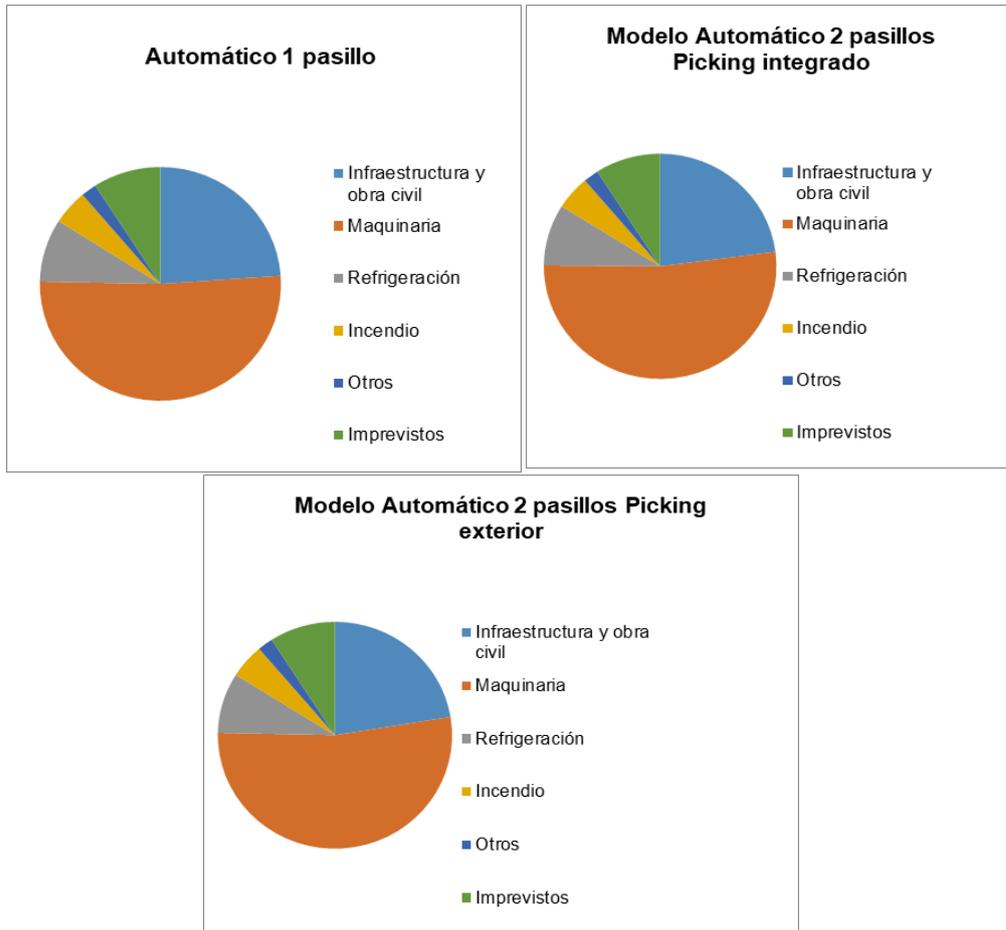


Figura 6.5: Inversión por categoría para escenarios automáticos

Adicionalmente se observa que la inversión por incendios aumenta en los escenarios automáticos, ya que es necesario tomar recaudos especiales con alturas elevadas, y el resto de las inversiones parecen comportarse de manera estable. En la figura 6.6 se observan la inversión por rubro graficada por escenario.

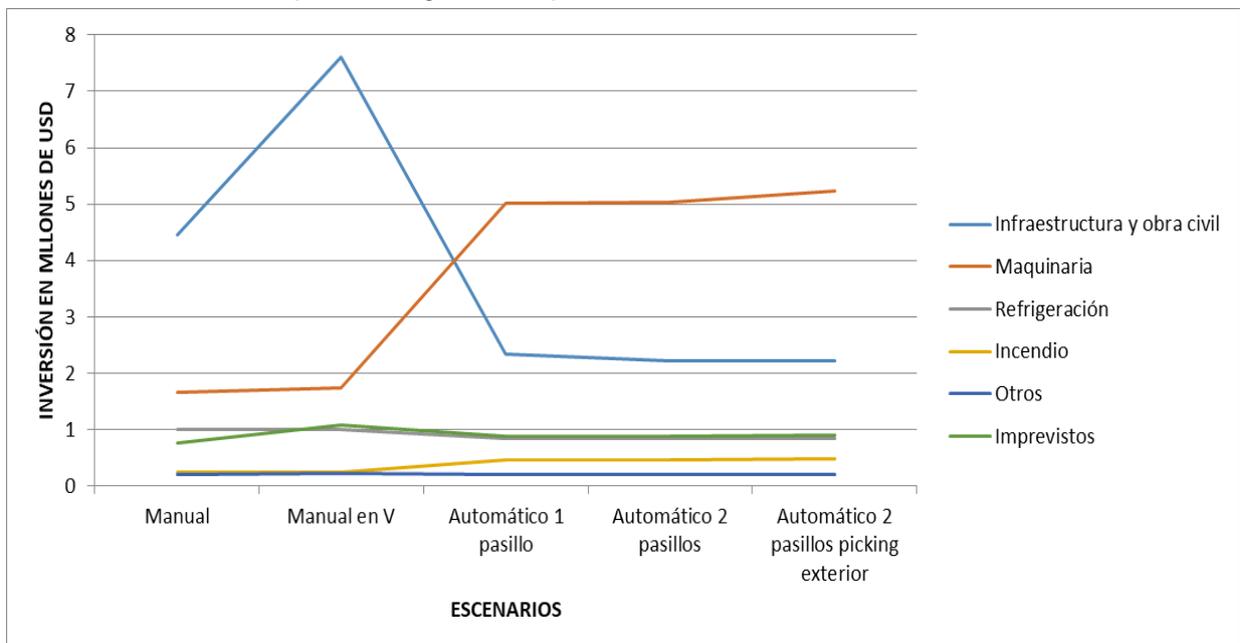


Figura 6.6: Gráfico inversión por categoría por escenario

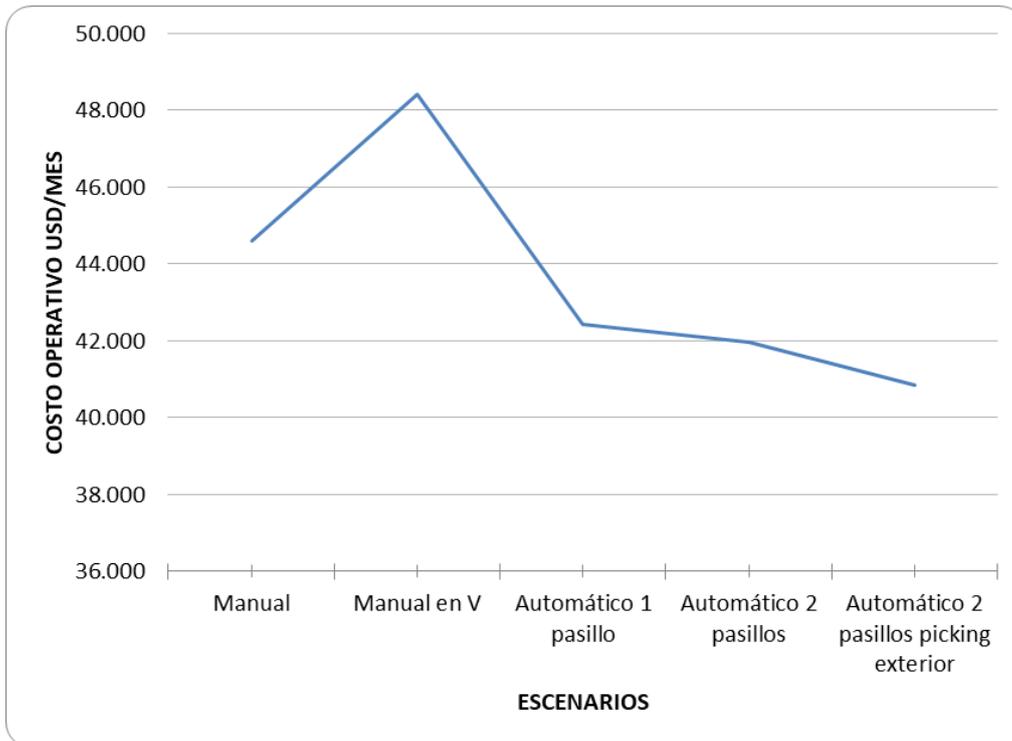


Figura 6.7: Gráfico costo operativo en USD por escenarios

En la figura 6.7 se muestran los costos operativos según escenarios. Se observa en el gráfico la casi igualdad entre el costo operativo de ambos modelos manuales. Por otro lado, también hay una igualdad entre los costos operativos de ambos modelos automáticos con el picking integrado. Los costos operativos son un 8% menor en el caso de los modelos automáticos con picking integrado en comparación con los escenarios manuales. Se observa una tendencia a la baja de los costos operativos a medida que aumenta el grado de automatismo. A continuación, análogamente a lo que se hizo en la inversión se mostrará en las figuras 6.8 y 6.9 como se distribuyen los costos por escenarios en los casos manuales y los automáticos respectivamente.

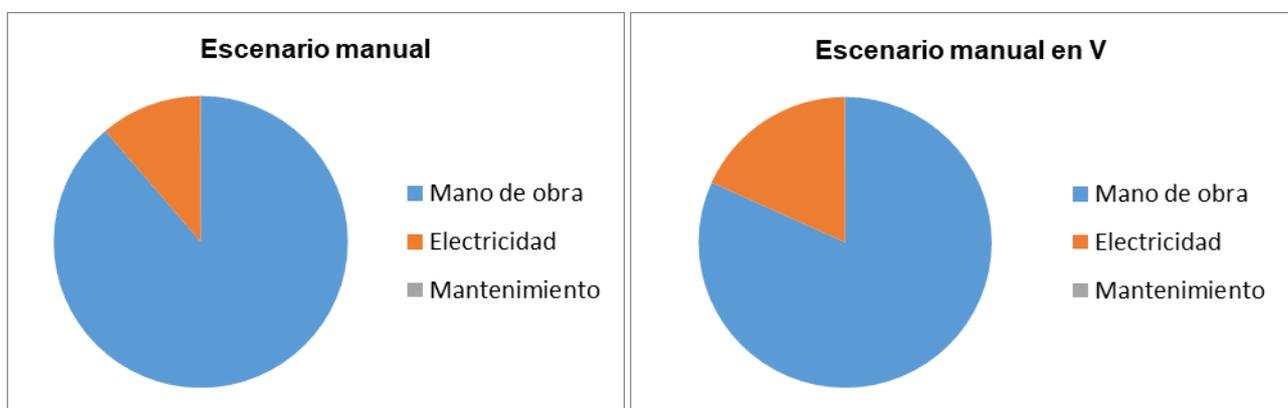


Figura 6.8: Costo operativo por categoría para escenarios manuales

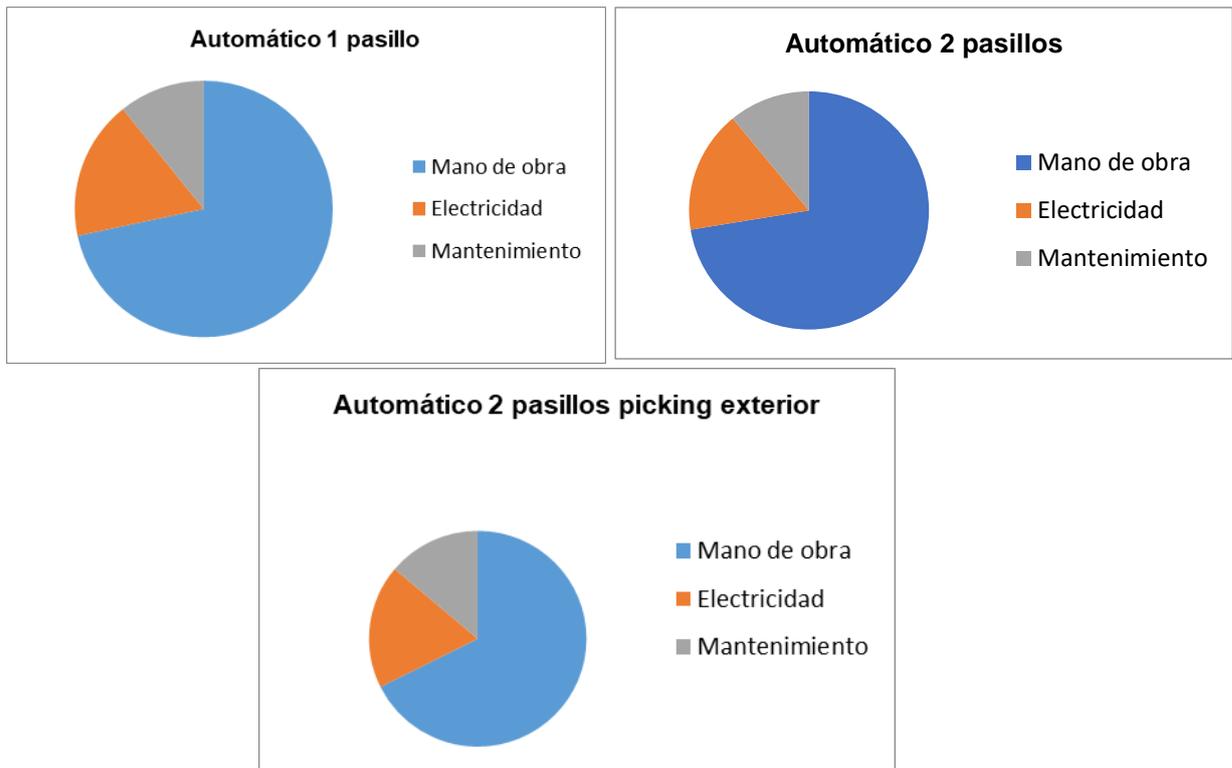


Figura 6.9: Costo operativo por categoría para escenarios automáticos

Lo que se observa en primer lugar de las figuras 6.8 y 6.9, es que el costo de mano de obra es el principal costo de los 5 escenarios representando más del 50% de los costos operativos. En segundo lugar, se observa una tendencia a la baja de este costo, a medida que aumenta el grado de automatización de los modelos. No se logra distinguir con exactitud cuál es el comportamiento de los costos restantes, por lo que se grafican por separado en la figura 6.10.

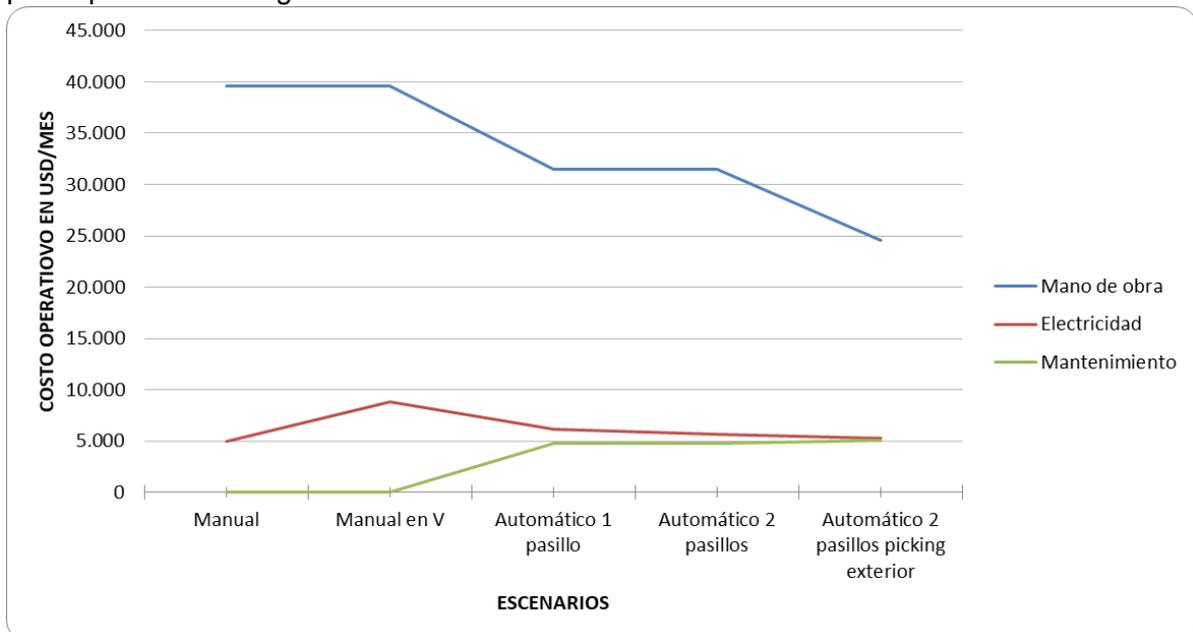


Figura 6.10: Gráfico costo operativo por categoría por escenario

En la figura 6.10 se ve como el costo de mano de obra disminuye cuando aumenta el grado de automatismo, a pesar de esto el costo de mano de obra sigue siendo el costo

principal en todos los escenarios. Adicionalmente, se observa una suba en los costos de mantenimiento a medida que el grado de automatismo aumenta.

En cuanto al consumo eléctrico, se puede decir que tiene un pico en el escenario manual en V debido a que es el escenario con mayor volumen y por tanto más carga térmica a vencer. Por otro lado, la energía eléctrica es un poco mayor en los escenarios automáticos debido al consumo de los transelevadores.

Se concluye que a mayor automatización mayor es el valor estimado de la inversión y por otro lado menor es el costo operativo estimado. En la inversión los elementos principales son la infraestructura y obra civil y la maquinaria, quienes invierten protagonismo dependiendo si analizamos un modelo manual o automático. En los costos operativos hay un elemento principal en ambos modelos y es la mano de obra.

7. Conclusiones

El objetivo principal del proyecto fue lograr el diseño de un almacén de productos congelados para una planta multi-producto. Para ello, se realizó una exhaustiva investigación bibliográfica que permitió obtener dos grandes conclusiones. En primer lugar, la ausencia de una metodología sistemática para el diseño de almacenes. En segundo lugar, se constató que para el diseño de este tipo de instalaciones la tendencia global son las automatizaciones con estructuras autoportantes, transelevadores automáticos y vehículos guiados automáticamente (AGV). En Uruguay los ejemplos de industria logística automatizada son escasos y predomina un enfoque manual para este tipo de actividades.

Se decidió explorar el diseño de ambos tipos de depósitos (manuales y automáticos), con el fin de compararlos. Se identificaron dos grandes áreas a aplicar el automatismo en los almacenes: en el ingreso al mismo con la utilización de los AGV, y en los movimientos internos con la utilización de los transelevadores. El automatismo aplicado a picking quedó por fuera del alcance del proyecto. Realizando variantes dentro de cada tipo de depósito, se realizó el diseño para 5 escenarios: 2 manuales y 3 automáticos.

Se comenzó por definir la profundidad de estantería de almacenamiento. Para esto, se utilizó un modelo para depósitos apilables, que busca hallar la profundidad óptima que minimice el espacio desperdiciado. Inspirado en este modelo, se dedujo uno equivalente para depósitos en los que se almacena por medio de racks selectivos. Sabiendo que el costo de la superficie (obra civil) en Uruguay es elevado, se plantearon distintos modelados que buscaron maximizar la altura de almacenamiento para así minimizar la superficie requerida y obtener la mejor profundidad de estantería para el caso. Respecto a estos modelos, se observó que además de ser no lineales, son no convexos. Esto se concluyó debido a que inicializándolos con distintos valores, se obtenían distintas soluciones para las variables de decisión, con el objetivo de optimizar la altura. A través de este análisis, se concluyó para nuestro caso de estudio, que la profundidad óptima requerida de estanterías sería baja tanto para los depósitos manuales como para los automáticos.

Acerca de los modelos utilizados, se resalta como positivo el haber encontrado una metodología con cierto nivel de rigurosidad, lo cual no es de uso común en el diseño corriente de estas instalaciones, ya que, según los profesionales del área y bibliografía consultada, se suelen realizar mayormente en base a la experiencia por su gran complejidad.

Con las decisiones de profundidad y dimensiones globales obtenidas, se procedió a realizar los diseños del sistema de refrigeración, combate anti-incendio, y las zonas auxiliares (staging, etc.). Finalmente, se integraron todos estos conceptos resultando un layout completo para cada uno de los 5 escenarios.

Al realizar el análisis de inversión y costos para los distintos escenarios, se observaron ciertas tendencias. En primer lugar, la inversión tiende a ser mayor en los escenarios automáticos y si se compara dentro de cada escenario los elementos principales, en los casos manuales el elemento que tiene mayor peso es la infraestructura y obra civil, mientras que en los casos automáticos es la maquinaria. Se observa que mientras la inversión por maquinaria aumenta en cuanto aumenta el grado de automatismo, la inversión en infraestructura y obra civil disminuye. La automatización dentro del almacén trae como consecuencia un ahorro considerable de la superficie requerida y esto se

refleja en los costos de construcción. En cuanto a los costos operativos, el elemento principal es la mano de obra para todos los escenarios (siendo un 78% de los costos totales para los escenarios manuales y un 69% para los automáticos). El costo de energía eléctrica es levemente mayor en los escenarios automáticos debido al consumo de los transelevadores. Para los casos automáticos, se tiene una contribución mayor del costo de mantenimiento respecto de los escenarios manuales.

Este proyecto puede abrir también otras líneas interesantes de investigación como ser la planificación de la operación de picking en mayor detalle, temáticas de simulación de operaciones y su optimización, etc.

8. Anexo

8.1 Análisis sobre resultados de profundidad

En este anexo se muestra la descripción y análisis de las distintas soluciones para los casos en los que se corrió el modelo. A pesar de ser un tanto repetitivo se decidió poner en el anexo ya que esto fue de utilidad para extraer las conclusiones sobre esta sección del manuscrito.

Ecuación depósito apilable, manual: análisis por categoría de productos general

El comportamiento observado en las corridas se describe a continuación:

- i) Si se inicia el modelo con una altura menor a la máxima, pero con una política de despacho que logra cumplir la restricción de profundidad óptima el modelo llevará la altura a la máxima posible, acomodando la política de despacho para que cumpla con la restricción de profundidad de manera ajustada. Un ejemplo de esta situación es la corrida número 1. Como se puede observar en la tabla 3.6, se inicia con política despacho de 3 días para todos los productos A, de 7 días para los productos B y de 13 días para los C, con una altura de 5 posiciones de pallet. El solver lleva la altura a la máxima ajustando la frecuencia de pedidos de los distintos productos para que cumpla de manera ajustada con la restricción impuesta sobre la profundidad, quedando la misma de 1,00 posición de pallet, con una altura de 7 posiciones.
- ii) Al inicializar el modelo con una altura menor a la máxima y una política de despacho con la que no se cumple la restricción impuesta sobre la profundidad, al igual que en la situación anterior, el modelo llevará la altura al máximo ajustando la política de despacho para cumplir con la restricción de profundidad óptima. Ejemplo de esto es la corrida número 2 en la que se parten de condiciones iniciales con las que se obtiene una profundidad de 0,813. Al correr el modelo se obtiene la altura máxima con la misma política de despacho que la corrida anterior.
- iii) Por último, si se parte de una política de despacho que logra satisfacer la restricción de profundidad óptima con la altura máxima, el solver tomará como buena esta solución. Ejemplo de esta situación es la corrida número 5 en la que se parte de la máxima frecuencia en días para todos los productos con una altura de 7 posiciones de pallet, obteniendo una profundidad de 1,20. Al correr el solver las variables permanecen constantes y toma esta solución como buena.

Las corridas 3 y 4 fueron realizadas con el fin de testear el comportamiento del solver. En la corrida 3 se probó partir de una política de despacho con la que se obtuvo la altura máxima (la política de despacho obtenida en la corrida número 2) y una profundidad de 1 posición de pallet, obteniendo una profundidad de 0,434. El solver simplemente lleva la altura a la máxima manteniendo la política de despacho constante para obtener una profundidad de 1,00. En el caso de la corrida número 4 se probó partiendo de la altura máxima y una frecuencia de pedido de 1 día para todos los productos, el solver hace lo

esperado llevando la política de despacho a la misma que la corrida anterior, manteniendo la altura.

Ecuación depósito apilable, manual: análisis por categoría (A)

El comportamiento observado para las distintas corridas de este caso se describe a continuación:

- i) Si se comienza por una altura menor a la máxima y con una política de despacho tal que la restricción de profundidad óptima se cumple se pueden dar dos situaciones al correr el modelo:
 - a. Se maximiza la altura dejando fija la política de despacho ya que con la misma se logra cumplir la restricción de profundidad óptima. Un ejemplo de esto es la corrida número 1. Se parte de una frecuencia de orden de 5 días para todos los productos (la máxima para este caso) y con una altura de 3 pallets. Con esto, el solver simplemente maximiza la altura llevándola a 7 pallets, logrando una profundidad de estantería de 1,77.
 - b. Se maximiza la altura cambiando la política de despacho de manera que se cumple de manera ajustada con la restricción impuesta sobre la profundidad óptima. Esto se puede ver en la corrida número 6 en la que con la frecuencia de pedidos que se muestra en la tabla y una altura de 6 pallets alcanza una profundidad de 1,01. Al correr el modelo, la política de despacho se modifica de forma que se alcanza la altura máxima de 7 posiciones de pallets con una profundidad óptima de 1,01.
- ii) Si se inicializa el modelo con una altura menor a la máxima y una política de despacho con las que no se alcanza a satisfacer la restricción impuesta sobre la profundidad óptima, el modelo llevará la altura a la máxima, acomodando la política de despacho de manera ajustada para alcanzar la profundidad mínima requerida. Un ejemplo de esta situación es la corrida número 2 en la que se inicializa con una frecuencia de pedido de 1 día para todos los productos y una altura de almacenamiento de 2 posiciones de pallets, dando bajo estas condiciones una profundidad óptima de 0,81. Al correr el modelo se obtiene una política de despacho de manera que maximiza la altura con una profundidad de estantería de 1,00.
- iii) Si se inicializa el modelo con la altura máxima y una política de despacho que logra cumplir con la restricción establecida sobre la profundidad óptima el modelo tomará como buena esta solución y la mantendrá. Esto se puede ver en la corrida número 3 en la que se inicializa el modelo desde la altura máxima y con una frecuencia de pedido de 5 días para todos los productos, obteniendo una profundidad óptima de 1,77 posiciones de pallets. Al correr el modelo, estos valores permanecen constantes.

Las corridas 4 y 5 se realizaron con el fin de testear el comportamiento del solver. En la corrida 4 partiendo de la altura máxima y política de despacho de 1 día para todos los productos se obtiene una política de despacho que alcanza de manera justa a satisfacer la restricción de profundidad óptima. Ingresando esta misma política de despacho para inicializar el modelo con una altura de un pallet, este simplemente maximiza la altura manteniendo la política de despacho.

Ecuación depósito apilable, manual: análisis por categoría (B)

El comportamiento observado para las distintas corridas de este caso se describe a continuación:

- i) Si se inicializa el modelo con una frecuencia de orden y una altura menor a la máxima, dando una profundidad que no satisface la restricción impuesta, el solver obtendrá una política de despacho de forma de ajustar la profundidad para que se alcance la mayor altura posible. Ejemplo de esto es la corrida número 1 en la que se inicia la frecuencia de orden en 7 días para todos los productos con una altura de almacenamiento de 5 pallets dando una profundidad de 0,987. Al correr el modelo la altura se ajusta a 6 pallets con una política de despacho de 10 días para todos los productos, dando una profundidad de estantería de 1,08.
- ii) Inicializando el problema con una frecuencia de pedido y una altura tales que cumplen con la restricción impuesta sobre la profundidad óptima el modelo lleva la solución nuevamente a 6 pallets con una política de despacho de 10 días y una profundidad óptima de 1,08. Esto sucede debido a que, a pesar de alcanzar la máxima altura con la cual se da una solución factible (6 posiciones de pallet), el solver explora si con una política de despacho mayor puede obtener una mayor altura. Al obtener que esto no es posible ni con la mayor política de despacho (10 días para todos los productos), deja esta política de despacho, obteniendo la misma solución que en la corrida anterior.

Ecuación depósito apilable, manual: análisis por categoría (C)

El comportamiento observado para las distintas corridas se observa a continuación:

- i) En la corrida número 1 se puede observar cómo partiendo de una frecuencia de pedido de 14 días con una altura de 4 posiciones de pallets se obtiene una profundidad de 1,55 posiciones de pallets. Corriendo el modelo, el mismo maximiza la altura, dejando constante la política de despacho ya que de esta forma se logra cumplir con la restricción impuesta sobre la profundidad, obteniendo así, una profundidad óptima de 1,17 posiciones de pallet con esta política de despacho.
- ii) En la corrida número 2 se parte de una frecuencia de pedido de 10 días para todos los productos y con la altura máxima de 7 posiciones de pallets, obteniendo con estas condiciones iniciales una profundidad de 0,99 posiciones de pallets. Al correr el modelo, la altura permanece constante mientras que la política de despacho cambia a 11 días para para todos los productos, resultando en una profundidad óptima de 1,04.

Por último, si se inicia el modelo desde la máxima política de despacho y la máxima altura obteniendo así una profundidad óptima de 1,40 posiciones de pallets. Al correr el modelo como es de esperar, las variables de decisión permanecen constantes y de esta forma, también la profundidad de estantería.

Ecuación depósito apilable, automático: análisis por categoría de productos general (enero, febrero y marzo)

Inicializando las variables de distintos valores, se analizaron las siguientes soluciones para este caso:

- i) Si se inicializa el modelo con una frecuencia de pedido y una altura en posiciones de pallets tal que la profundidad óptima requerida es menor a 1 el modelo ajustará la política de despacho de forma que, la restricción de profundidad se cumple de manera “ajustada” para la mayor altura posible para este grupo de meses. Esto se puede observar en la corrida número 1 en la que se inicializa el modelo con una frecuencia de pedido de 5 días para todos los productos con una altura de 18 posiciones de pallets. Bajo estas condiciones la profundidad requerida es de 0,37. Al correr el modelo la política de despacho se ajusta de manera que maximiza la altura a 9 posiciones de pallets y se obtiene una profundidad de 1,00 posición de pallet.
- ii) Si se inicializa el modelo con una política de despacho y una altura que satisface la restricción impuesta sobre la profundidad, pero no alcanza la altura máxima para las condiciones dadas, se pueden dar dos situaciones:
 - a. El modelo ajusta la frecuencia de pedido de manera que logra maximizar la altura cumpliendo la restricción impuesta sobre la profundidad. Un ejemplo de esto se puede observar en la corrida número 4 en la que se comienza con una altura de 8 posiciones de pallets y una política de despacho de 18 días para todos los productos dando así una profundidad de 1,06 posiciones de pallets. Al correr el modelo el mismo obtiene la altura máxima de 9 posiciones de pallets con una política de 20 días para todos los productos, requiriéndose una profundidad de 1,05 posiciones de pallets.
 - b. La segunda situación es que el modelo simplemente maximice la altura dejando constante la frecuencia de pedido ya que con la misma se logra satisfacer la restricción impuesta sobre la profundidad óptima. Esta situación se puede observar en la corrida 2 donde se inicializa el modelo desde una altura de 8 posiciones de pallets con una frecuencia de pedido de 20 días para todos los productos con lo que se obtiene una profundidad óptima de 1,11 posiciones de pallets. Al correr el modelo se maximiza la altura a 9 posiciones de pallets manteniendo la política de despacho constante y obteniendo nuevamente una profundidad de estantería de 1,05 posiciones de pallets.
- iii) Por último, vale la pena analizar en particular la situación de la corrida número 4. En esta se observa cómo partiendo de una altura de 9 posiciones de pallets con una política de despacho de 19 días para todos los productos se obtiene una profundidad óptima de 1,02 posiciones de pallets. Al correr el modelo se esperaría que el mismo mantuviese los valores de las variables de decisión constante ya que maximiza la altura y cumple con todas las restricciones del modelo, pero al hacerlo se puede observar como el modelo lleva la política de despacho a 20 días, manteniendo la altura constante y obteniendo nuevamente una profundidad de 1,05 posiciones de pallets. Esto

Proyecto de grado Diseño almacén producto terminado en planta multi-producto

se puede deber al método de búsqueda de soluciones del algoritmo de Excel ya que al tener espacio para aumentar el tamaño de las órdenes eventualmente podría obtener una mayor altura, pero al hacer esto, ninguna altura mayor a las 9 posiciones de pallets compila con la restricción impuesta sobre la profundidad, por lo cual el solver se termina quedando con esta solución.

Ecuación depósito apilable, automático: análisis por categoría de productos general (abril, mayo y junio)

En la corrida número 1 se parte de una frecuencia de pedido de 5 días para todos los productos y una altura de 18 posiciones de pallets lo que resulta en una profundidad de estantería de 0,34. Al correr el modelo, el solver ajusta la política de despacho de forma que se obtiene la máxima altura posible para este conjunto de meses, siendo 8 posiciones de pallets, obteniendo así que para estas condiciones de trabajo se requiere una profundidad de 1,00 posiciones de pallet. Esta situación es análoga a la situación i) descrita para los meses de mayor demanda, con la salvedad de que se obtiene una altura menor.

En la corrida número 2 se observó que si se inicia de una solución que cumple con las restricciones y maximiza la altura, como era de esperar se mantendrán las variables constantes.

En la corrida número 3 se observa cómo partiendo por debajo de la altura máxima, con una política de despacho tal que se requieren 1,09 posiciones de pallets, el modelo maximiza la altura a 8 pallets manteniendo la política de despacho constante y obteniendo una profundidad de estantería de 1,02 posiciones de pallets.

Ecuación depósito apilable, automático: análisis por categoría de productos general (A)

Si se observa la corrida número 1 se ve una solución que parte de una altura inferior a la máxima y con la política de despacho máxima. Al correr el modelo ajusta la altura a la máxima manteniendo la política de despacho.

La corrida número 2 es similar con la diferencia de que se parte de una combinación de altura y profundidad en la que no se logra satisfacer la restricción impuesta sobre la profundidad de estantería. Al correr el solver se obtienen los mismos resultados que en la corrida anterior.

Por último, en la corrida número 3 se parte de una política de despacho menor a la máxima para algunos productos y desde la altura máxima. Cómo en casos anteriores, a pesar de cumplir con las restricciones el solver afecta la política de despacho. Esto es probable que suceda, como se mencionó anteriormente debido al algoritmo utilizado por el solver para la búsqueda de soluciones.

Ecuación depósito racks, manual: análisis general.

En la corrida número 1 se parte de una altura de almacenamiento y una política de despacho con la que se obtiene una profundidad óptima menor a la requerida (0,575). Al correr el modelo se ajusta la política de modo de cumplir con la restricción impuesta sobre la profundidad óptima, llevando la política de despacho a 20 días para todos los productos.

La corrida número 2 es de similares características a la 1, pero esta vez se parte con una altura y política de despacho tal que la profundidad óptima es mayor a 1. Al correr el modelo en estas condiciones se llegan a los mismos resultados que la parte anterior. Al observar que de ambas maneras se ajustaba la política de despacho en 20 días obteniendo los mismos resultados, se probó partir de la altura máxima que se alcanzaría en estas condiciones (5 posiciones de pallet) y con una política de despacho de forma que se alcanzaba a cumplir con la restricción de profundidad óptima, pero con política de despacho menor a 20 días para algunos productos. A pesar de partir de una solución que es factible y alcanza la máxima altura para esta situación, la política de despacho vuelve a ser la máxima para todos los productos como ya se había visto en casos anteriores.

Bibliografía

- [1] Fioravanti, R. (2014). *El ABC de los costes logísticos*
- [2] Errasti, A. (2011). *Diseño y gestión de almacenes y plataformas logísticas world class warehousing*
- [3] Baker, P & Canessa, M. (2009). *Warehouse design: a structured approach*
- [4] Rouwenhorst, G. (2000). *Warehouse design and control: framework and literature review*
- [5] García, R. & Guadalupe, J. (2017). *Logística una herramienta en los negocios*
- [6] TRANSEOP. (2019). *La evolución de la logística en la historia*
- [7] Ariza, N. (2018). *De la logística 1.0 a la 4.0 ¿Cómo llegamos aquí?*
- [8] Martínez, N. (2011). *Cartwright y la evolución de los telares mecánicos*
- [9] <https://www.oas.org>. *Globalización y su impacto en el comercio mundial y regional*
- [10] www.webyempresas.com. *Definición de línea de montaje*
- [11] Ahnert, S. (2012). *Industria 4.0 menos trabajo manual más trabajo intelectual*
- [12] <https://www.manufacturingterms.com/AGV.html>. *Definición AGV*
- [13] Jing L. (2012). *The summary of AGV Guidance Technology*
- [14] <https://www.dta.es/productos/agv/>. *Diferentes tipos de guiado*
- [15] <https://www.mecalux.es/>. *Transelevadores para pallets*
- [16] <https://www.westfaliausa.com/es/productos/sistemas-de-flujo-de-pales/sistema-de-flujo-de-pales-fifo>
- [17] fp.uoc.fje.edu
- [18] <https://www.ramirez.com.uy/index.php/productos/ver/Modelo-PBR-20N-85>
- [19] <https://www.ramirez.com.uy/index.php/productos/ver/Modelo-PBS-20N-86>
- [20] <https://www.meidensha.com/catalog/PA52-3139.pdf>
- [21] Vivaldini, K. & Roche, L. (2015). *Integrated tasks assignment and routing for the estimation of the optimal number of AGVs*
- [22] Bartholdi, J. & Hackman, S. (2017). *WAREHOUSE & DISTRIBUTION SCIENCE*.
- [23] Dulanto, M. & Benitez, A. (2005). *Guía para la prevención de riesgos laborales en el almacenamiento y apilado de materiales*.

- [24] <https://www.ramirez.com.uy/index.php/productos/ver/Modelo-RB14-25N2-91>
- [25] <https://www.infocasas.com.uy/docs/informe-metro-cuadrado-infocasas.pdf>
- [26] <https://www.logismarket.es/blog/medidas-palets-estandares-extendidos/>
- [26] https://mecaluxuy.cdnwm.com/catalogos/catalogo-depositos-automaticos.1.3.pdf#_ga=2.109225733.1665936813.1573399620-372023994.1547159023
- [27] <https://www.camarasfrigorificas.es/>
- [28] <https://panelsandwich.uy/frigorifico/panel-sandwich-fachada-frigorifica/>
- [29] <https://0grados.com.mx/paneles-sandwich/>
- [30] <https://panelsandwich.uy/frigorifico/panel-sandwich-fachada-frigorifica/>
- [31] <https://es.slideshare.net/irisyaninacamposjime/ciclos-de-refrigeracintermodinamica>
- [32] http://files.danfoss.com/TechnicalInfo/Dila/01/DKRCI.PA.000.C5.05_Manual%20de%20aplicaciones.pdf
- [33] <https://es.slideshare.net/droiartzun/seleccin-de-equipos-de-refrigeracin>
- [34] <https://es.slideshare.net/martorque/calculo-carga-refrigeracin>
- [35] https://www.academia.edu/11858200/Termodin%C3%A1mica-BALANCE_TERMICO
- [36] <http://www.refrigeracionzelsio.es/evaporadores-estaticos/364-frimetal-sn-1.html>
- [37] <http://www.refrigeracionzelsio.es/blog/evaporadores/>
- [38] https://coolproyect.es/2017/12/06/seleccion_de_evaporadores/
- [39] <https://www.bitzer.de/es/es/compresores-de-tornillo/>
- [40] <https://studylib.es/doc/5978149/%E2%80%9CANSI-IAR--2%E2%80%9D-normativa-nacional-americana-para-equipos>
- [41] (2010). *Carga de fuego en edificaciones y áreas de riesgo*.
- [42] https://www.ecoembes.com/sites/default/files/web_guia_v3/img_guia/Peso_de_Producto.pdf
- [43] <https://www.transeop.com/blog/Palet-Americano-universal-caracteristicas-medidas/401/>
- [44] <http://www.europalet.com/palets-1200-x-800/palets-de-plastico/palet-plastico-higienico-1200-x-1000-plasteel-210>
- [45] Bonnet, A. (2015) "Proyecto de fin de carrera memoria descriptiva planta de helados"

[46] Garrido, C. Bernal, F. Loma-Osorio, B & Hospitaler, A. (2007). *Análisis de sistema de protección contra incendios en una cámara frigorífica mediante la aplicación de un modelo computacional de simulación de incendios.*

[47] (2016). *NFPA: Standard for the installation of sprinklers system.*

[48] Iglesias, A. (2012). *Manual de gestión de almacenes*

[49] <https://www.crown.com/content/dam/crown/pdfs/es-es/especificaciones/recogepedidos-nivel-alto-sp3500-especificaciones-es.pdf>

[50] <http://www.uruguay.generadordeprecios.info>

[51] <http://www.docksteel.com.br>

[52] <https://toyota-forklifts.es/>

[53] <https://www.jungheinrich.es/>

[54] <https://www.amazon.es/>

[55] <http://www.trinopallets.com.uy/>

[56] <https://spanish.alibaba.com/>

[57] <https://www.agvnetwork.com/>

[58] <https://www.bps.gub.uy/bps/valores.jsp?contentid=5478>

[59] <https://portal.ute.com.uy/sites/default/files/docs/Pliego%20Tarifario%20Vigente.pdf>