

Diseño de un almacén inteligente para productos congelados con integración de tecnologías 4.0 y refrigeración por CO₂

Autoras:

Cutropía, María Laura

Oostdijk, Milagros

Trabajo Final de la Carrera de Ingeniería Industrial

Departamento de Ingeniería Industrial

Facultad de Ingeniería

Universidad Nacional de Mar del Plata

Mar del Plata, Año 2025



Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Industrial

Trabajo Final:

“Diseño de un almacén inteligente para productos congelados con integración de tecnologías 4.0 y refrigeración CO₂”

AUTORAS:

Cutropía, María Laura

Oostdijk, Milagros

DIRECTORA:

Esp. Ing. María Betina Berardi.

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero y profundo agradecimiento a nuestras familias y amigos, quienes nos acompañaron en cada etapa de este camino. Su apoyo incondicional, su paciencia y sus palabras de aliento fueron una fuente constante de motivación y nos brindaron la fuerza necesaria para avanzar incluso en los momentos de mayor desafío.

Deseamos también dedicar un especial reconocimiento a nuestras amigas de la facultad, con quienes compartimos años de estudio, proyectos, risas y desvelos. Su compañía y amistad hicieron de esta etapa una experiencia mucho más enriquecedora y llevadera, y su apoyo fue fundamental para sostenernos en los momentos más exigentes de la carrera.

De manera muy especial, agradecemos a nuestra directora de trabajo final, Betina Berardi, por su generosa dedicación, su orientación siempre clara y sus valiosos aportes, que enriquecieron enormemente este proyecto. Su compromiso y acompañamiento resultaron esenciales para guiarnos y alentarnos a dar siempre lo mejor de nosotros.

Asimismo, reconocemos con gratitud a cada uno de los docentes que, a lo largo de nuestra formación, compartieron sus conocimientos y experiencias, contribuyendo de manera significativa a nuestro crecimiento académico y personal.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, institución que nos brindó la oportunidad de formarnos tanto profesional como humanamente. Este trabajo es el reflejo no solo de nuestro esfuerzo, sino también del compromiso educativo y del entorno académico que nos acompañó durante toda nuestra trayectoria universitaria.



ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
TABLA DE SIGLAS	ix
RESUMEN	xi
PALABRAS CLAVE.....	xi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Contexto y justificación	1
1.2. Planteamiento del problema	1
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	2
1.4. Alcance y limitaciones	2
2. MARCO TEÓRICO O REFERENCIAL.....	4
2.1. Almacenes	4
2.1.1. Almacenes en frío.....	4
2.1.2. Requisitos del almacenaje en frío	4
2.2. Diseño del almacén	6
2.3. Sistemas de almacenaje	7
2.4. Zonificación del área de almacenamiento	9
2.5. Equipamiento de manipulación y transporte interno.....	10
2.6. Equipos de carga y descarga	10
2.7. Parque Industrial Aurel	11
2.7.1. Normativa urbanística y constructiva	11
2.8. Conservación de alimentos	12
2.9. Tecnologías de refrigeración industrial.....	12
2.9.1. Sistemas con amoníaco	12
2.9.2. Sistemas con freón	13
2.9.3. Sistemas con dióxido de carbono (CO ₂)	13
2.9.4. Criterios de evaluación: eficiencia, seguridad y sustentabilidad.....	15
2.10. Planificación de recursos empresariales (ERP)	15



2.10.1. Sistemas de gestión de almacenes.....	16
2.11. Integración de tecnologías 4.0 en logística	16
2.11.1. Internet de las cosas (IoT)	17
2.11.2. Big Data y analítica	18
2.11.3. Automatización	18
3. METODOLOGÍA.....	19
4. DESARROLLO	20
4.1. Análisis del lote disponible en el Parque Industrial Aurel.....	20
4.1.1. Dimensiones y superficie útil	20
4.1.2. Zonificación operativa del almacén	20
4.2. Diseño del almacén	22
4.2.1. Selección del sistema de estanterías	22
4.2.2. Selección de equipos de manejo de materiales.....	24
4.2.3. Dimensionamiento del almacén	28
4.2.4. Zona de carga y descarga	30
4.2.5. Plano del almacén	31
4.3. Evaluación de sistemas de refrigeración.....	31
4.3.1. Equipos de refrigeración necesarios	32
4.3.2. Recolección de datos técnicos	33
4.3.3. Potencia requerida.....	35
4.3.4. Matriz comparativa multicriterio	35
4.3.5. Resultado matriz comparativa multicriterio	37
4.4. Tecnologías 4.0.....	38
4.4.1. Propuesta de sistema de gestión digital del almacén (WMS).....	38
4.4.2. Selección de solución WMS e integración con ERP.....	40
4.4.3. Modelado operativo en SAP.....	40
4.4.4. Integración de SAP con los AGVs	51
4.4.5. IoT.....	51
4.4.6. Analítica de datos.....	52
4.4.7. Mapa de procesos	53
4.4.8. Definición de indicadores de desempeño (KPIs).....	53
4.5. Evaluación del impacto de tecnologías 4.0 en la toma de decisiones	57



5. CONCLUSIONES	49
6. BIBLIOGRAFÍA	51
7. ANEXO	56
7.1. Anexo I: “Selección del sistema de estanterías”	56
7.2. Anexo II: “Diseño de las estanterías tipo <i>Shuttle</i> ”	58
7.3. Anexo III: “Cálculo de altura y niveles de estantería”	60
7.4. Anexo IV: “Cálculo de la profundidad total”	62
7.5. Anexo V: “Evaluación de la disposición óptima del sistema de estanterías”	62
7.6. Anexo VI: “Cálculo de la cantidad de muelles”	64
7.7. Anexo VII: “Selección del refrigerante para el almacén”	66
7.8. Anexo VIII: “Selección del WMS”	68



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dimensiones del módulo	28
Tabla 2: Altura y niveles de estantería	28
Tabla 3: Disposición del sistema de estanterías.....	29
Tabla 4: Matriz comparativa de proveedores	38
Tabla 5: Indicadores de desempeño	47
Tabla 6: Evaluación comparativa de decisiones de diseño frente a KPIs.....	48
Tabla I.1: Selección de estanterías.....	57
Tabla II.1: Dimensiones módulo de almacenamiento.....	60
Tabla V.1: Configuración transversal.....	63
Tabla V.2: Configuración longitudinal.....	64
Tabla VII.1: Selección del refrigerante.....	67
Tabla VIII.1. Criterios de selección del WMS y su ponderación	69
Tabla VIII.2: Ponderación de WMS.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Zonificación del almacén.....	21
Figura 2: Transelevador.....	25
Figura 3: Carro Shuttle Automatizado.....	25
Figura 4: Sistema automatizado con horquillas para carga y descarga	25
Figura 5: Líneas transportadoras.....	25
Figura 6: AGV para pallets.....	25
Figura 7: Robot de picking.....	26
Figura 8: Plano del almacén	31
Figura 9: ECO ₂ Middle	35
Figura 10: Central de refrigeración de CO ₂	35
Figura 11: Interacción entre SAP ERP, SAP EWM y el WCS.....	42
Figura 12: Mapeo de procesos logísticos	45
Figura 13: Radar de impacto de KPIs en dimensiones estratégicas.....	48
Figura II.1: Manipulación de los Pallets.....	59
Figura II.2: Dimensiones del Módulo.....	59
Figura III.1: Alturas por nivel y altura total.....	61
Figura IV.1: Profundidad de los pallets.....	62

TABLA DE SIGLAS

AD:	Ancho disponible transversal
AE:	Ancho de cada calle de estantería
AP:	Ancho de pasillo para EMM
AGVs:	<i>Automated Guided Vehicles</i>
ASHRAE:	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
ASRS:	<i>Automatic Storage and Retrieval System</i>
C.C.:	Criterios de comparación
CAA:	Código Alimentario Argentino
CFCs:	Clorofluorocarbonos
CO ₂ :	Dióxido de Carbono
COP:	Coficiente de Rendimiento
EMM:	Equipo de manejo de materiales
ERP:	<i>Enterprise Resource Planning</i>
EWM:	<i>Extended Warehouse Management</i>
FIFO:	<i>First in, First Out</i>
FOS:	Factor de Ocupación del Suelo
FTE:	<i>Full Transcritical Efficiency</i>
GWP:	Potencial de Calentamiento Global
HACCP:	<i>Hazard Analysis and Critical Control Points</i>
HCFCs:	Hidroclorofluorocarbonos
HFC:	Hidrofluorocarbono
HU:	<i>Handling Unit</i>
IA:	Inteligencia Artificial
IoT:	Internet de las Cosas
IRAM:	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
KPI:	<i>Key Performance Indicator</i>
LD:	Largo disponible total en profundidad
LIFO:	<i>Last In, First Out</i>
LOSC:	<i>Layout-Oriented Storage Control</i>
LU:	Largo útil en profundidad
MFS:	<i>Material Flow System</i>
NH ₃ :	Amoníaco
ODP:	Agotamiento de la Capa de Ozono
PCA:	Potencial de calentamiento atmosférico

PP: Profundidad de cada pallet

PT: Pasillo transversal

R-717: Amoníaco

R-744: Dióxido de Carbono

SENASA: Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria

SKU: *Stock Keeping Units*

WCS: *Warehouse Control System*

WMS: *Warehouse Management System*

RESUMEN

El trabajo final aborda el diseño de un almacén inteligente para productos congelados, integrando tecnologías 4.0 y refrigeración eficiente con CO₂, en el marco del Parque Industrial Aurel.

En primer lugar, se seleccionó el sistema de estanterías más adecuado para maximizar la capacidad sin comprometer la operatividad. A través de una matriz comparativa, se determinó que el sistema Pallet *Shuttle* Automatizado ofrecía la mejor combinación de densidad, velocidad, seguridad y adaptabilidad. Su implementación permitió alcanzar una capacidad de 1170 pallets en 500 m², con cinco niveles verticales y una disposición longitudinal optimizada.

Luego, se evaluaron distintas tecnologías de refrigeración industrial (NH₃, HFCs y CO₂) mediante criterios de eficiencia, seguridad y sustentabilidad. Se optó por un sistema transcrito de CO₂, destacando su bajo impacto ambiental (GWP=1), alta eficiencia energética y compatibilidad con materiales comunes. La solución seleccionada, ECO2Large de Costan, se fabrica localmente en Rosario, lo que garantiza soporte técnico y disponibilidad de repuestos. Se propuso una configuración modular con tres unidades en paralelo, asegurando redundancia operativa y escalabilidad.

Se seleccionó un sistema de gestión de almacenes en base a criterios de trazabilidad, compatibilidad con tecnologías 4.0 y capacidad de integración con sensores y automatismos. La elección se orientó hacia una solución comercial consolidada que permitiera el seguimiento en tiempo real de productos congelados, la optimización dinámica de ubicaciones y la generación de indicadores clave de desempeño. Se priorizó la interoperabilidad con sistemas ERP, la visualización 3D del *layout* y la conectividad con dispositivos IoT y sensores de temperatura.

Finalmente, se abordó el impacto de las tecnologías 4.0 en la toma de decisiones. Se incorporaron sensores IoT, AGVs con navegación SLAM, sistemas robotizados de *picking* y analítica avanzada. Estas herramientas permiten anticipar fallos, optimizar recursos y mejorar la calidad de la información, transformando el almacén en un nodo logístico inteligente.

PALABRAS CLAVE

Almacén, *Shuttle*, automatización, internet de las cosas



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto y justificación

La logística de frío enfrenta actualmente un escenario de presión a nivel global y local, impulsado por el crecimiento sostenido en la demanda de productos congelados. A nivel mundial, el mercado de almacenamiento en frío alcanzó un valor estimado de 138 mil millones de dólares en 2023, con proyecciones que superan los 373 mil millones para 2031 (Kings Research, 2024). Este crecimiento está asociado al aumento del consumo de alimentos perecederos, los avances en tecnologías de refrigeración y la expansión del comercio electrónico de productos alimenticios (Mecalux, 2024).

En Argentina, este fenómeno se ve reflejado en una saturación creciente de la infraestructura frigorífica. La disponibilidad de depósitos con temperatura controlada resulta insuficiente para atender el ritmo de la demanda, generando cuellos de botella operativos y afectando la eficiencia logística, particularmente en sectores sensibles como el alimentario. La falta de capacidad ociosa limita la competitividad y dificulta la conservación adecuada de productos bajo condiciones estrictas de temperatura (Palazzo, 2024). Este desfase entre capacidad instalada y requerimientos reales exige el desarrollo de nuevas soluciones de almacenamiento en frío.

En el partido de General Pueyrredón, la demanda de almacenamiento en frío también se encuentra en expansión. Empresas como Solimeno, Frío Polar y Grupolar SA ya operan en la región, aunque la infraestructura disponible continúa siendo limitada frente a las necesidades del mercado. En este contexto, el diseño de nuevas instalaciones frigoríficas inteligentes surge como una respuesta estratégica para fortalecer la capacidad logística local y acompañar el desarrollo de la industria alimentaria.

Por otra parte, se destaca la apertura del nuevo Parque Industrial "Aurel Parq", estratégicamente ubicado a tan solo quince minutos de la ciudad de Mar del Plata, sobre la Ruta 88, a la altura del kilómetro 5,5.

El predio cuenta con una superficie total de 41 hectáreas, distribuidas en 107 lotes adaptables a industrias de categorías 1 y 2, con superficies que varían entre los 2.000 m² y los 6.800 m². Entre sus principales características se destacan el acceso diferenciado para tránsito pesado, calles pavimentadas de 12 metros de ancho y veredas de 8 metros, lo que garantiza una circulación ágil y segura dentro del predio.

1.2. Planteamiento del problema

El almacén que se diseñará en este trabajo se desarrolla sobre un lote de 2.000 m² en el parque Aurel, en el cual se llevará a cabo el diseño del almacén que será destinado al almacenamiento en frío. La principal problemática radica en la optimización del espacio disponible sin



comprometer la capacidad ni la accesibilidad. Luego, se plantea el desafío de encontrar un sistema de refrigeración que permita conservar los alimentos en condiciones óptimas, minimizando el impacto ambiental y cumpliendo con las normativas vigentes. A su vez, se busca resolver la dificultad para mantener un control preciso del inventario que garantice la trazabilidad de los productos y minimice fallos. Por último, se identifica la necesidad de incorporar tecnologías 4.0 que mejoren la calidad y disponibilidad de la información para una toma de decisiones estratégicas más eficiente, permitiendo anticipar fallos, optimizar recursos y fortalecer la competitividad del sistema logístico.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

El objetivo general de este proyecto es diseñar un almacén para productos congelados incorporando tecnologías y soluciones logísticas de última generación que mejoren el aprovechamiento del espacio, la conservación de la cadena de frío y la trazabilidad de las operaciones. Para ello, se prevé la utilización de sistemas de estanterías, equipos de manejo de materiales (EMM), refrigeración por dióxido de carbono (CO₂) y gestión digital.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos incluyen:

- a) Seleccionar un sistema de estanterías que permita maximizar la capacidad de almacenamiento sin comprometer la accesibilidad operativa y seleccionar los equipos de manejo de materiales más adecuados para operar en ambientes de congelado, considerando seguridad, eficiencia y compatibilidad con el sistema de estanterías.
- b) Seleccionar un sistema compacto de refrigeración por CO₂ para el almacén, a partir de la estimación comparativa de sus ventajas operativas, ambientales y de seguridad frente a alternativas basadas en freón o amoníaco.
- c) Proponer un sistema digital de gestión de almacenes que permita mejorar la trazabilidad, eficiencia operativa y control de inventario.
- d) Evaluar cómo las tecnologías 4.0 mejoran la calidad de la información para la toma de decisiones estratégicas.

1.4. Alcance y limitaciones

El proyecto abarca el diseño conceptual y técnico de un almacén de frío, orientado a un escenario representativo de una planta procesadora de alimentos congelados. Aunque no se vincula a una empresa específica, el diseño busca simular condiciones reales para evaluar la viabilidad de distintas soluciones tecnológicas. Como parte del desarrollo, se establecerán criterios técnicos que sirvan como herramientas de apoyo en la toma de decisiones, permitiendo justificar las alternativas seleccionadas en función de su eficiencia, adaptabilidad y rendimiento.



Este trabajo se limita al análisis conceptual y técnico del diseño del almacén, por lo que no contempla la implementación práctica ni la construcción del sistema propuesto. Tampoco se abordarán aspectos operativos, económicos o logísticos a gran escala, ya que el enfoque está centrado exclusivamente en el desarrollo teórico y en la evaluación de tecnologías desde una perspectiva técnica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Almacenes

Un almacén se define como un área planificada en términos de m² y m³, cuyo objetivo es lograr la máxima ocupación de los productos con el mínimo espacio requerido (Anaya, 2011). Dado que el espacio es un recurso costoso, todo el coste de la infraestructura física y los procesos de almacenamiento se reflejan en el valor de los productos almacenados. Por lo tanto, el dimensionamiento del almacén es una de las tareas estratégicas más importantes en la gestión logística. Las funciones básicas incluyen: custodia y conservación de inventarios, manipulación física de productos (tanto en entrada como en salida), preparación de pedidos (proceso de *picking*, preparación de expediciones y control) y carga de camiones.

2.1.1. Almacenes en frío

El almacenamiento en frío consiste en conservar los productos a baja temperatura para que estos puedan mantener sus propiedades. Se requiere de instalaciones logísticas adaptadas a las exigencias del sector. Además, las estanterías de las cámaras frigoríficas deben ser estructuras diseñadas para trabajar en ambientes fríos (Mecalux, 2024).

Su clasificación depende de la regulación de la temperatura, diferenciando entre:

- Refrigeración: depósitos que mantienen temperaturas entre 0 y 10 °C, utilizados en el sector alimentario (lácteos, embutidos, etc.), farmacéutico y clínico.
- Congelación: cámaras frigoríficas que mantienen temperaturas entre -30 °C y 0 °C, especialmente en la industria de alimentos congelados.

2.1.2. Requisitos del almacenaje en frío

El almacenamiento en frío requiere mantener temperaturas constantemente bajas para preservar la calidad y seguridad de los productos, aunque estas condiciones pueden afectar negativamente el rendimiento de los equipos involucrados. Debido a la sensibilidad de los productos frente a variaciones de temperatura, las cámaras frigoríficas suelen estar equipadas con sensores que monitorizan la temperatura de manera continua y con deshumidificadores que minimizan la formación de hielo. Mantener la temperatura adecuada en todo momento es fundamental, lo que representa un desafío adicional considerando el constante flujo de productos que entran y salen del almacén.

El Decreto Nacional 4238/1968, en su Capítulo V, establece los requisitos obligatorios para la construcción y operación de cámaras frigoríficas en establecimientos que elaboran productos de origen animal. La normativa exige superficies lisas, impermeables y de fácil limpieza; puertas aisladas que puedan abrirse desde el interior; iluminación artificial de 40 a 60 unidades luz con llaves internas y externas; ventilación adecuada; sistemas de alarma accionables desde el

interior; y equipos de refrigeración aprobados por SENASA. Estas disposiciones son de cumplimiento obligatorio en todo el territorio nacional para los establecimientos habilitados por el organismo.

Complementariamente, el Código Alimentario Argentino (CAA) establece requisitos específicos para el almacenamiento de alimentos congelados. Entre ellos, se exige que las cámaras mantengan temperaturas que aseguren la congelación adecuada de los productos, que cuenten con sistemas de medición y registro de temperatura (termómetros, higrómetros, higrógrafos) y que dispongan de sistemas de alarma que alerten sobre desviaciones de temperatura.

A nivel internacional, el Codex Alimentarius (CAC/RCP 8-1976) recomienda desarrollar un plan HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points) específico para cada etapa de la cadena de frío, garantizando la inocuidad de los productos. Asimismo, establece que las cámaras frigoríficas deben operar a temperaturas de -18 °C o inferiores, con mínimas fluctuaciones, considerando la temperatura como un punto crítico de control cuya gestión inadecuada podría comprometer la seguridad alimentaria.

Por su parte, las normas ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) constituyen un referente internacional en el diseño, operación y seguridad de sistemas de refrigeración. Entre las más relevantes se destacan la ASHRAE 15, que establece los requisitos de seguridad para sistemas de refrigeración, incluyendo la clasificación de refrigerantes, límites de concentración, procedimientos de instalación y mantenimiento seguro, y la ASHRAE 34, que define un sistema uniforme de numeración y clasificación de los refrigerantes según su toxicidad e inflamabilidad. En Argentina, estas normas internacionales son adoptadas y adaptadas por el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) para proyectos locales de refrigeración industrial, incluyendo cámaras frigoríficas. Su aplicación permite garantizar que los sistemas cumplan criterios de seguridad, eficiencia energética y manejo adecuado de refrigerantes, asegurando el cumplimiento normativo y la protección de las personas y el medio ambiente en la operación de instalaciones frigoríficas.

Finalmente, una correcta limpieza de las cámaras frigoríficas es crucial para evitar la proliferación de microorganismos que puedan dañar los productos almacenados. Al igual que en las salas blancas, se realizan dos procedimientos: la limpieza visible de la suciedad y la desinfección, utilizando productos químicos que eliminan los microorganismos perjudiciales para las mercancías (Mecalux, 2024).



2.2. Diseño del almacén

El concepto de *lay-out*¹ o distribución en planta en los almacenes hace referencia a la disposición física de las diferentes áreas de trabajo dentro del almacén y a la ubicación de los recursos dentro de ellas. Este aspecto determina de manera significativa el funcionamiento y la eficiencia operativa del mismo (Anaya, 2011).

El diseño de un depósito frigorífico debe adaptarse a las necesidades particulares de cada negocio, teniendo en cuenta aspectos como la capacidad de recepción y expedición de productos, y la disposición de muelles de carga y búferes temporales. Además, hay que considerar los sistemas de almacenamiento utilizados, los tipos de unidades de carga y el grado de automatización implementado en la instalación (Mecalux, 2020).

En todo almacén, se distinguen diversas áreas de trabajo. Cada una está condicionada por limitaciones constructivas como las vías de acceso, altura de la nave, estructuras de las vigas, entre otras. Además, se limitan por factores ambientales, como refrigeración, cámaras isotérmicas o normas de seguridad e higiene. Según Anaya (2011), las áreas más relevantes son:

- Área de almacenaje: comprende el espacio ocupado por la mercadería y por los sistemas de almacenamiento, como estanterías u otras soluciones. Su superficie en m² y m³ depende de la técnica aplicada (por ejemplo, estanterías fijas), de la cantidad de niveles utilizados y de las dimensiones de los pasillos y corredores, que varían según el sistema empleado.
- Área de manipulación: representa el espacio dedicado a la clasificación y preparación de pedidos que por ejemplo incluye actividades de empaquetado, etiquetado, plastificación, entre otros. También involucra el uso de equipos adicionales, como sistemas de control de pesaje o la carretilla retráctil.
- Área de carga y descarga: se vincula directamente con el diseño de los muelles, que suelen ser un factor limitante de la capacidad operativa. Para evitar cuellos de botella, es fundamental que cuenten con el espacio y la flexibilidad necesarios para asegurar un flujo eficiente de mercancías. La explanada incluye la zona entre la plataforma de carga y la línea de cerca, abarcando el estacionamiento y las áreas de maniobra, indispensables para garantizar la accesibilidad y operación de los vehículos.
- Área de servicio: se deben diferenciar los servicios internos, como oficinas, archivo, zona para cargas de baterías, baños y botiquines, de los servicios externos, que incluyen estacionamiento de vehículos y puestos de vigilancia.

¹ Término en inglés que hace referencia al diseño o distribución planificada de los elementos dentro de un espacio, como un almacén, con el fin de optimizar el uso del espacio y los flujos operativos.

El flujo de materiales en el almacén depende del *lay-out*, que suele adoptar configuraciones en U, T o I. El diseño en I se caracteriza por la especialización de muelles y menor flexibilidad, ya que divide funciones y equipos para carga y descarga, reduciendo la versatilidad operativa. En cambio, el diseño en U unifica los muelles, lo que aporta mayor flexibilidad, facilita la expansión y permite una mayor polivalencia del personal y de los equipos. El diseño en T constituye una variante del diseño en U, incorporando dos muelles laterales para aumentar la capacidad operativa.

2.3. Sistemas de almacenaje

Se refieren a los recursos destinados al almacenamiento, custodia y control de productos dentro del almacén, y pueden clasificarse según las necesidades operativas y el tipo de acceso a la carga, así como por el nivel de densidad de almacenamiento.

Uno de los sistemas más utilizados es el almacenamiento selectivo, apreciado por su versatilidad y por el acceso directo que ofrece a cada unidad de carga (Rijaya, 2025). Este sistema permite ubicar y retirar cada pallet sin mover otros, lo que facilita la gestión de múltiples referencias y favorece una alta rotación de inventario. Dentro de esta categoría se incluyen las estanterías convencionales o selectivas, adecuadas para productos paletizados, y las estanterías de *picking* manual, empleadas para mercancías en cajas o unidades sueltas.

Además, forman parte de este grupo las estanterías cantiléver, que son estructuras diseñadas para almacenar cargas largas como tubos, perfiles o tableros. Están formadas por columnas verticales y brazos en voladizo ajustables, lo que permite adaptarlas a distintas dimensiones de mercancía. Ofrecen acceso directo, gran versatilidad y son ideales para sectores como la automoción, la decoración o la maquinaria (Mecalux, 2020).

También existen sistemas de almacenaje de alta densidad como los racks *Drive-In*, *Drive-Through* y *Push-Back*, diseñados para maximizar el uso del espacio en almacenes con grandes volúmenes de productos.

Las estanterías compactas *Drive-In* y *Drive-Through* minimizan los pasillos de trabajo de la carretilla elevadora, ya que el acceso se realiza desde el interior de la estructura, donde se introducen las carretillas para cargar y descargar. Los pallets se colocan sobre carriles de apoyo situados a cada lado del nivel de carga. Además, cada pasillo suele destinarse a una única referencia de producto, lo que facilita el control del inventario.

La principal diferencia entre ambos sistemas radica en la gestión de inventario:

- *Drive-In* opera bajo el sistema LIFO (*Last In, First Out*), con un solo acceso para carga y descarga. Es el sistema compacto más común por su sencillez, ideal para productos no perecederos, de baja rotación o almacenamiento por lotes, como materiales de

construcción o productos metálicos. En el caso de los racks de doble profundidad, los pallets se almacenan en dos filas, lo que requiere auto elevadores con horquillas extensibles.

- *Drive-Through* permite el acceso por ambos extremos, por lo que funciona bajo el sistema FIFO (*First In, First Out*). Esto lo convierte en una opción ideal para productos perecederos o con caducidad, como alimentos, bebidas o productos químicos.

Otra diferencia importante es el espacio requerido para su instalación. El sistema *Drive-In* puede instalarse junto a una pared, ocupando menos superficie, mientras que el *Drive-Through* requiere accesibilidad por ambos lados. Ambos sistemas son muy utilizados en entornos de almacenaje en frío o congelación y en almacenes donde el aprovechamiento del espacio es crítico debido a restricciones físicas o altos costos por metro cuadrado (Ar racking, 2022).

El sistema *Push-Back* es un tipo de almacenamiento por acumulación que permite guardar hasta cuatro pallets en profundidad por nivel, operando bajo el sistema LIFO. Funciona mediante carros montados sobre rieles inclinados que desplazan los pallets por empuje, permitiendo que la carga y descarga se realicen desde un único frente. Está especialmente indicado para productos de media rotación con varias unidades por referencia. Entre sus principales ventajas se destacan el óptimo aprovechamiento del espacio, con alta densidad de almacenamiento y mínima pérdida de altura útil; su versatilidad, al permitir almacenar referencias distintas por nivel y operar en rangos de temperatura de -30 °C a 40 °C; su seguridad y eficiencia, al evitar que las carretillas ingresen a la estructura y requerir solo un pasillo frontal; y su agilidad operativa, al reducir los recorridos del montacargas y facilitar las tareas de carga y descarga. Aunque implica una mayor inversión inicial frente a sistemas más simples, puede incrementar la capacidad de almacenamiento hasta en un 75 % comparado con métodos convencionales (Tradelog, 2022).

Por otra parte, existen sistemas altamente automatizados, como el pallet *Shuttle* que es una solución que optimiza el espacio disponible mediante el uso de carros satélite motorizados. Estos dispositivos, controlados por un operario a través de un mando a distancia, transportan de forma autónoma las cargas paletizadas dentro de los canales de las estanterías. Permite operar bajo sistemas FIFO o LIFO, incluso en entornos de congelación de hasta -30 °C, este sistema reduce significativamente el riesgo de accidentes y los costes de mantenimiento al eliminar el uso de carretillas dentro de las estanterías. Además, permite una mayor eficiencia operativa y control del inventario mediante sensores que contabilizan las unidades almacenadas, convirtiéndolo en una opción altamente recomendable para operaciones logísticas de gran volumen y rotación (Ar racking, 2023).

Un caso especial de los sistemas *Shuttle* es el sistema *Shuttle* multinivel para pallets con una solución ASRS (*Automatic Storage and Retrieval System*) altamente automatizada que combina lanzaderas por nivel, elevadores verticales y un sistema de gestión inteligente, permite un flujo continuo de mercancías las 24 horas, con operaciones rápidas y precisas de entrada y salida. Diseñado para maximizar la capacidad de almacenaje (hasta 10 pallets/m²) y agilizar la



preparación de pedidos (hasta 73 pallets/hora), este sistema funciona con lanzaderas alimentadas por baterías y gestionadas mediante software inteligente que optimiza los movimientos en tiempo real (ADDVERB, 2024).

2.4. Zonificación del área de almacenamiento

La zonificación es el proceso de organizar y distribuir los productos en distintas áreas del espacio de almacenamiento, con el fin de optimizar el manejo y la eficiencia operativa. Existen diversos criterios como son:

- Por tipo de almacenaje y paletización
- Por la naturaleza de los productos.
- Por la división industrial o familia de productos.
- Por razones de complementariedad.

Cada zona de almacenamiento en un almacén está dividida en diversas "ubicaciones", las cuales deben ser identificadas mediante un código específico. Este código actúa como un sistema de coordenadas virtual, similar a un plano, donde cada hueco, estante o espacio de almacenamiento tiene una identificación única (Anaya, 2011).

Los productos se pueden ubicar de dos maneras: mediante el sistema de posición fija, donde cada producto tiene un lugar permanente con un código de ubicación asignado, o el sistema de posición aleatoria, en el que los productos se colocan en cualquier espacio disponible dentro de la zona asignada, lo que permite un uso más flexible del espacio. Aunque el sistema de posición aleatoria es a veces llamado "caótico", es en realidad muy eficiente cuando se utiliza tecnología para gestionar las ubicaciones. Se optimiza el espacio y mejora los procesos de *picking*, adaptándose a la disponibilidad de espacio y los criterios de productividad.

Una distribución eficiente del espacio en instalaciones logísticas requiere asignar superficies proporcionales a las distintas funciones operativas, considerando criterios de frecuencia de uso, nivel de rotación y tipo de actividad. La mayor parte de la superficie suele estar destinada al área de almacenamiento principal, que incluye tanto las estanterías como los pasillos de acceso, y representa habitualmente entre el 45 % y el 55 % del total disponible. Las áreas de recepción y expedición requieren entre un 10 % y un 15 %, ya que concentran el flujo de entrada y salida de mercadería, y su dimensionamiento debe permitir maniobras simultáneas de carga y descarga sin interferir con el resto del sistema. Por su parte, las zonas de preparación de pedidos, consolidación y clasificación de carga suelen ocupar entre un 5 % y un 10 %, dependiendo de la modalidad operativa y del grado de fraccionamiento de los productos (Tompkins et al., 2010).

Las áreas de soporte administrativo, como oficinas operativas, sanitarios, vestuarios y espacios de mantenimiento, representan entre un 9 % y un 13 % en conjunto, y deben disponerse próximas a los accesos logísticos y con conectividad directa con las zonas operativas. Por último, se recomienda reservar entre un 10 % y un 15 % para circulaciones generales, zonas de

seguridad y control y un 5 % a 10 % adicional como superficie de reserva para ampliaciones o reconfiguración futura, lo cual permite dotar al *layout* de una mayor flexibilidad frente a cambios operativos o crecimiento de la demanda (Tompkins et al., 2010).

2.5. Equipamiento de manipulación y transporte interno

Estos equipos permiten trasladar los productos dentro del almacén, desde su recepción hasta su almacenamiento y posterior expedición. Entre ellos se encuentran:

- **Transpaletas manuales y eléctricas:** se utilizan para el movimiento de pallets en distancias cortas dentro del almacén, principalmente en áreas donde el espacio es reducido.
- **Transelevadores:** es un equipo robotizado que opera de forma automática en pasillos de almacenamiento, desplazándose longitudinal y verticalmente para ubicar o extraer pallets a distintas alturas. Funciona coordinado por un sistema de gestión digital, que optimiza la trazabilidad y el control de inventario. Su estructura incluye un mecanismo de elevación y extracción, permitiendo operar a simple o doble profundidad, con capacidad de carga de hasta 1.500 kg y alturas mayores a 30 m. Los modelos con microprocesador ejecutan movimientos con alta precisión y eficiencia energética, aprovechando la recuperación de energía en fases de descenso o frenado.
- **Sistemas de transporte por rodillos o bandas transportadoras:** se utilizan en la zona de carga y descarga principalmente. En almacenes frigoríficos, es fundamental que las bandas transportadoras sean fabricadas con materiales que resistan la humedad y las bajas temperaturas.
- **Los AGVs (*Automated Guided Vehicles*)** son vehículos autónomos guiados que se utilizan para el transporte interno de mercancías en entornos logísticos y de fabricación. Estos vehículos siguen rutas predefinidas, generalmente a través de guías físicas, como carriles magnéticos o cables, o bien mediante tecnología de navegación láser. Son ideales para realizar tareas repetitivas sin la intervención humana.

2.6. Equipos de carga y descarga

Estos equipos facilitan la entrada y salida de productos en el almacén frigorífico, asegurando un flujo de trabajo eficiente y minimizando la pérdida de frío en el proceso.

- **Plataformas niveladoras de docks:** dispositivos que compensan la diferencia de altura entre el piso del almacén y el camión de carga. Permiten un tránsito seguro y fluido de los equipos de manipulación, evitando golpes que puedan dañar los productos congelados o los pallets.

- Sellos y cortinas térmicas para docks: elementos fundamentales para evitar la pérdida de temperatura en las áreas de carga y descarga. Los sellos crean una barrera hermética entre el camión y la entrada del almacén, mientras que las cortinas térmicas impiden la entrada de aire caliente cada vez que se abre una puerta.

2.7. Parque Industrial Aurel

El Parque Industrial Aurel se encuentra ubicado en el Partido de General Pueyrredón, en el acceso sur a la ciudad de Mar del Plata, con conectividad directa a la Ruta Provincial N.º 88 y proximidad a nodos logísticos estratégicos como el puerto y la zona frutihortícola. Se trata de un parque industrial privado con planificación integral, orientado a la radicación de empresas vinculadas a la industria, la logística, la tecnología y los servicios productivos (Aurel Parque Industrial, 2024). Cuenta con habilitación municipal y provincial conforme a la Ley N.º 13.744 de Promoción Industrial, lo cual permite a las empresas allí instaladas acceder a beneficios impositivos y programas de incentivo a la inversión. El predio cuenta con infraestructura de servicios completa, incluyendo red de agua corriente, desagües cloacales, suministro eléctrico mediante línea de media tensión, pavimento apto para tránsito pesado, conexión a internet por fibra óptica y servicio de telefonía fija. Además, el acceso pavimentado facilita la operación con vehículos de gran porte y maquinaria pesada.

2.7.1. Normativa urbanística y constructiva

El Parque Aurel se rige por un reglamento técnico que establece las condiciones urbanísticas, de ocupación del suelo y edificación. Las parcelas deben tener una superficie mínima de 2.000 m² y hasta 6.800 m². Permite exclusivamente la radicación de establecimientos industriales de categoría 1 y 2, es decir, actividades compatibles con entornos de bajo y mediano impacto ambiental (Aurel Parque Industrial, 2024).

El Factor de Ocupación del Suelo (FOS) permitido es de 0,5, lo que implica que la superficie construida en planta baja no puede superar el 50 % del área del lote. La altura máxima edificable es de 15 metros.

El reglamento establece además retiros obligatorios que deben respetarse para garantizar condiciones de seguridad, accesibilidad y mantenimiento: 5 metros en el frente, y 3 metros en los laterales y fondo del lote. Estas zonas deben permanecer libres de construcciones y no pueden ser destinadas a carga, descarga o estacionamiento. También se requiere la construcción de un cerramiento perimetral de al menos 2,20 metros de altura, que puede ser de tipo ciego o transparente, y la diferenciación de accesos para tránsito pesado y liviano, con el fin de ordenar la circulación interna y minimizar interferencias entre operaciones (Aurel Parque Industrial, 2024).



2.8. Conservación de alimentos

La congelación de alimentos es un método de conservación que consiste en someterlos a temperaturas inferiores a su punto de congelación. Esto provoca un cambio en su estado físico, transformando el agua presente en el alimento en cristales de hielo, lo que modifica algunas de sus propiedades. Este proceso generalmente se realiza entre los -18°C y los -35°C, aunque la temperatura exacta puede variar según el tipo de producto.

El objetivo principal de la congelación es detener la actividad de microorganismos y bacterias, evitando así el deterioro del alimento sin comprometer significativamente su valor nutricional. Además, al reducir drásticamente la actividad química y enzimática, como la oxidación, se prolonga la vida útil del producto sin alterar demasiado su calidad. Hay que contemplar que, si bien la actividad bacteriana se encuentra en su mayoría paralizada, siguen viviendo durante el proceso, por eso es vital mantener la cadena de frío con el objetivo que no se reinicie la actividad bacteriana y consiga el deterioro del alimento. Si se rompe la cadena de frío, el alimento deja de ser óptimo para volver a congelarse debido a la reactivación de la actividad bacteriana.

En cuanto al tiempo de congelación, es importante considerar que un alimento puede mantener sus propiedades óptimas por un período de hasta 12 meses, garantizando su calidad y preservando sus características originales. Sin embargo, si este tiempo se excede o las condiciones de congelación no son adecuadas, la actividad de los microorganismos, que inicialmente estaba detenida, no resurgirá al descongelarse el producto. A pesar de que no habrá proliferación de bacterias, el alimento perderá algunas de sus propiedades, lo que podría comprometer su calidad y seguridad para el consumo.

2.9. Tecnologías de refrigeración industrial

La refrigeración industrial cumple un papel esencial en los procesos productivos que requieren mantener condiciones térmicas controladas. La elección del sistema depende de la temperatura requerida, la eficiencia, la seguridad y el impacto ambiental del refrigerante. Entre las tecnologías más utilizadas se destacan los sistemas que emplean amoníaco (NH₃), freones y dióxido de carbono (CO₂), cada uno con características y aplicaciones específicas.

2.9.1. Sistemas con amoníaco

El NH₃, también conocido como R-717, es uno de los refrigerantes más utilizados en la industria debido a sus excelentes propiedades termodinámicas (Intarcon, 2024). Se trata de un gas incoloro, compuesto por nitrógeno e hidrógeno, con un olor muy fuerte y penetrante. Puede encontrarse tanto de forma natural como sintetizarse artificialmente. Para su uso en sistemas de refrigeración, se emplea en forma de amoníaco anhidro, es decir, con una pureza del 99% y prácticamente sin agua. En estas condiciones, puede alcanzar temperaturas de evaporación de hasta -70 °C, lo que lo convierte en una opción muy eficiente para aplicaciones de baja

temperatura. Además, no destruye la capa de ozono, se disocia rápido y no tiene vida en la atmósfera. El ciclo de refrigeración con amoníaco comienza cuando el gas seco, proveniente del separador y a temperatura de evaporación, es aspirado por el compresor. Allí es comprimido hasta alcanzar la presión y temperatura de condensación y posteriormente es enviado al condensador.

En el condensador, el refrigerante se enfría, se condensa y cede su calor al medio exterior. Desde el condensador, el amoníaco líquido fluye hacia un dispositivo de expansión, donde se reduce su presión y temperatura hasta alcanzar condiciones de evaporación.

Esta mezcla bifásica (líquido + "*flash gas*") ingresa al separador, donde se separan ambas fases. El líquido refrigerante es impulsado desde el separador hacia el evaporador mediante una bomba. En el evaporador, el amoníaco absorbe el calor del ambiente a refrigerar, cambiando de fase nuevamente a gas. Finalmente, el gas seco retorna al compresor, cerrando así el ciclo (Bernard, 2023).

La refrigeración con amoníaco presenta ciertas desventajas que deben tenerse en cuenta en el diseño y operación de los sistemas. Este refrigerante no es compatible con el cobre, por lo que debe evitarse el uso de componentes fabricados con este material. Además, es inflamable en determinadas concentraciones y su inhalación en altas dosis puede ser perjudicial para la salud (Inditer, 2022).

2.9.2. Sistemas con freón

El término freón se utiliza comercialmente para designar a una familia de compuestos halogenados, principalmente clorofluorocarbonos (CFCs) e hidroclorofluorocarbonos (HCFCs), entre los que se destacan el R-12, R-22 y R-134a.

En los sistemas que emplean freón, el fluido refrigerante actúa como caloportador, permitiendo el intercambio de calor mediante sucesivos cambios de estado físico asociados a variaciones de presión y temperatura (Inditer, 2020).

Una de las principales desventajas de este tipo de refrigerantes es su elevado potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (ODP) y su Potencial de Calentamiento Global (GWP) (Nenwell, 2023). Debido a su impacto ambiental, su uso se encuentra regulado por normativas internacionales como el Protocolo de Montreal y muchos de estos compuestos han sido prohibidos o están en proceso de eliminación progresiva (Chemours, 2025). Por este motivo, a igualdad de condiciones técnicas, se prioriza la selección de refrigerantes con menor ODP y GWP, con el objetivo de reducir el impacto ambiental y cumplir con la legislación vigente.

2.9.3. Sistemas con dióxido de carbono

Los sistemas de refrigeración que utilizan CO₂ (R-744) presentan múltiples ventajas, entre ellas su baja toxicidad, alta eficiencia energética y un impacto ambiental prácticamente nulo, ya que

su GWP es 1 (*Greenhouse Gas Protocol*, 2016). Debido a su alta densidad volumétrica, se necesita menos caudal de refrigerante, lo que reduce el consumo energético en bombeo. Además, es compatible con materiales comunes como el cobre y el acero inoxidable para cañerías.

Sin embargo, el CO₂ trabaja a presiones elevadas, especialmente en climas cálidos donde no puede condensar y debe operar en régimen transcrito, lo que representa un desafío técnico. Por razones de seguridad, es obligatorio instalar detectores de CO₂ en salas de máquinas, ya que, en caso de fuga, puede desplazar el oxígeno del ambiente y generar riesgo de asfixia.

2.9.3.1. Sistemas transcritos de CO₂

Las instalaciones de refrigeración transcricas con CO₂ utilizan este gas como único refrigerante y operan a presiones y temperaturas superiores a su punto crítico (31,1 °C). En estas condiciones, el CO₂ no se condensa como los refrigerantes tradicionales, sino que entra en estado supercrítico, comportándose como un fluido intermedio entre gas y líquido. Esto permite una alta eficiencia en determinadas aplicaciones, pero requiere componentes especialmente diseñados para soportar las elevadas presiones del sistema (COFRICO, 2022).

Un sistema transcrito de una etapa se divide funcionalmente en dos secciones de presión: alta presión y presión intermedia. La sección de alta presión comienza en el compresor de alta presión, continúa a través del gas *cooler*, donde se disipa el calor sin condensación en sentido clásico y finaliza en la válvula de control de alta presión. Las presiones de diseño en esta sección suelen encontrarse entre 90 y 120 bar. El gas retorna a los compresores por un bypass, mientras que el líquido se expande y pasa a los evaporadores de media temperatura, completando el ciclo.

En los sistemas de dos etapas, se añade una línea de baja temperatura, donde parte del líquido también se expande hacia evaporadores de baja, y el gas resultante es comprimido por un compresor adicional antes de mezclarse con el resto del gas y volver al compresor principal.

La sala de máquinas puede ser de tipo centralizada, donde todos los compresores y equipos están ubicados en un único lugar, o compacta, con unidades más pequeñas integradas (Parola, 2025). Aun así, optar por una solución descentralizada, como sistemas transcritos en rack distribuidos o unidades autónomas, puede reducir significativamente el riesgo asociado a fugas de CO₂, porque se limita la cantidad de refrigerante por sector y se evita la acumulación peligrosa en una única sala cerrada. Esta estrategia mejora la seguridad operativa y facilita el cumplimiento de normativas relacionadas con la ventilación y detección de gases.

Estas centrales suelen ser del tipo "*skid*" (montadas sobre un bastidor) e incluyen los compresores, el separador de aceite, el receptor de líquido (si aplica), el panel de control y parte de la tubería. El *gas cooler* (equivalente al condensador en sistemas tradicionales) a veces se integra en la misma unidad compacta si es una solución tipo "*roof-top*" o exterior, o puede ser una unidad remota.



2.9.3.2. Sistemas subcríticos de CO₂

Los sistemas subcríticos de CO₂ o en cascada utilizan este gas como refrigerante secundario, operando siempre por debajo de su punto crítico, y combinándolo con un refrigerante primario como el amoníaco o un HFC (hidrofluorocarbono) de bajo PCA (potencial de calentamiento atmosférico). En este esquema, el CO₂ se emplea principalmente para la refrigeración a bajas temperaturas, mientras que el refrigerante primario se encarga de condensar el CO₂. Esta configuración permite trabajar con presiones más bajas que en sistemas transcíticos, lo que simplifica el diseño y reduce los requerimientos de robustez en los componentes. Sin embargo, implica mayor complejidad operativa al involucrar dos refrigerantes y puede aumentar la demanda de espacio (Sanguinetti, 2020).

Además, la recuperación de calor puede ser más limitada o complicada de implementar en comparación con los sistemas transcíticos de CO₂, ya que el calor útil se genera principalmente en el circuito primario y no en el secundario.

2.9.4. Criterios de evaluación: eficiencia, seguridad y sustentabilidad

La eficiencia en los sistemas de refrigeración industrial se mide principalmente por su capacidad para generar frío utilizando la menor cantidad posible de energía. Esto incluye indicadores clave como el Coeficiente de Rendimiento (COP), el consumo energético específico y la integración de sistemas de control automático que optimicen la operación según la demanda térmica. Un sistema eficiente no solo reduce los costos operativos, sino que también mejora el rendimiento global del proceso industrial al mantener condiciones térmicas constantes y adecuadas.

En cuanto a la seguridad, es esencial que el diseño incluya dispositivos de protección como válvulas de alivio, alarmas por fugas y sistemas de corte automático. Además, el cumplimiento de normativas técnicas y la capacitación adecuada son claves para minimizar riesgos y proteger tanto a las personas como a la infraestructura.

La sustentabilidad en la refrigeración industrial se enfoca en minimizar el impacto ambiental del sistema a lo largo de su ciclo de vida. Esto implica el uso de refrigerantes con bajo GWP y nulo ODP, así como la eficiencia energética como estrategia para reducir emisiones indirectas de CO₂.

Además, se consideran prácticas como la recuperación de refrigerantes, el reciclaje de componentes y la posibilidad de integrar fuentes de energía renovable, lo que contribuye a una operación más responsable y alineada con los objetivos ambientales actuales.

2.10. Planificación de recursos empresariales (ERP)

Un ERP (*Enterprise Resource Planning* o Planificación de Recursos Empresariales) es un sistema de gestión empresarial que integra en una única plataforma los procesos y la información de las distintas áreas de una organización, como compras, ventas, inventario, finanzas, recursos humanos, producción y logística.

Su objetivo es centralizar los datos, automatizar tareas y proporcionar información en tiempo real para optimizar la toma de decisiones. En el área logística, un ERP permite coordinar la recepción, almacenamiento, preparación y despacho de mercancías, asegurando que el inventario esté siempre actualizado, que las órdenes se procesan de forma eficiente y que la trazabilidad de los productos esté garantizada en todo momento.

2.10.1. Sistemas de gestión de almacenes

El *Warehouse Management System* (WMS) es un subsistema de información que contribuye a la administración del flujo de productos y al manejo de las instalaciones dentro de la red logística (Ballou, 2004). Es una aplicación de software que da soporte a las operaciones diarias de un almacén permitiendo la gestión centralizada de tareas, el seguimiento de los niveles de inventario y la ubicación de existencias.

Además, se encarga de controlar las operaciones relacionadas con el abastecimiento de materia prima y componentes para la producción, así como de atender los pedidos de los clientes. Según Ballou, los elementos que componen un WMS pueden clasificarse en:

- a) recepción
- b) almacenamiento
- c) administración de inventarios
- d) procesamiento de órdenes y cobros
- e) preparación de pedidos

Entre las principales ventajas de implementar un WMS se encuentran, la obtención de información en tiempo real sobre el uso de los recursos del almacén, la reducción de costos mediante la optimización de operaciones, como el diseño eficiente de rutas de *picking* y la programación de maquinaria, y la mejora en la calidad del servicio, lo cual implica un manejo adecuado de la trazabilidad, exactitud en el cumplimiento de especificaciones de la mercancía despachada, y confiabilidad en los tiempos de entrega (SAP, 2024). El WMS es un sistema que permite un control preciso del stock.

Sin embargo, una de las principales desventajas radica en los elevados costos de implementación, derivados tanto de su capacidad de procesamiento como de la necesidad de reestructurar los procesos de almacenamiento existentes.

2.11. Integración de tecnologías 4.0 en logística

La Logística 4.0 representa una transformación de la logística tradicional mediante la incorporación de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), inteligencia artificial (IA), *big data* y sistemas automatizados. Su propósito es hacer que la cadena de suministro sea más

eficiente, flexible y capaz de responder en tiempo real a las demandas del mercado (Barleta, Pérez, & Sánchez, 2020).

En la sesión “*Keeping up with Smart Factories*” del Foro Económico Mundial en Davos (2025), uno de los panelistas, Anish Shah, destacó cómo las fábricas inteligentes pueden servir de modelo para la logística moderna, mediante el uso de IA para optimizar la eficiencia energética, sensores conectados (“*connected.ai*”) y sistemas que permiten redirigir producción en tiempo real dependiendo de la demanda.

Por ejemplo, en ese mismo panel se mencionó cómo, en ciertas plantas, la implementación de IA permitió reducir significativamente los tiempos de diseño y arranque de sistemas, pasando de ocho días a dos días, lo que mejora sustancialmente la capacidad de respuesta ante cambios en los pedidos o interrupciones logísticas.

Además, la convergencia tecnológica también abre nuevas posibilidades para la Logística 4.0, ya que la combinación de IA, IoT y robótica permite desarrollar cadenas de suministro inteligentes, resilientes y con capacidad de autoajuste en tiempo real. En la sesión “*Where Next for Technology Convergence*” del Foro Económico se resaltó cómo la integración de tecnologías emergentes, desde la IA hasta los sensores avanzados y la computación de próxima generación, genera innovaciones que, aplicadas al ámbito logístico, potencian la trazabilidad, la eficiencia energética y la capacidad de anticiparse a interrupciones en el mercado global (*World Economic Forum, 2025*).

2.11.1. Internet de las cosas (IoT)

El IoT es una red de dispositivos físicos interconectados que están integrados con sensores, software y tecnología de conectividad, lo que permite recopilar, enviar y recibir datos entre sí o hacia sistemas centrales de procesamiento. Esta interconexión permite monitorear, controlar y recibir datos en tiempo real, generando información valiosa para la toma de decisiones (IBM, 2025).

Estos dispositivos adaptados a la logística se utilizan para mejorar la visibilidad, la eficiencia y la seguridad en la cadena de suministro (Del Castillo, 2023). Algunos de los más utilizados son:

- Los sensores de temperatura y humedad permiten monitorear las condiciones ambientales en tiempo real, siendo especialmente útiles para el transporte de productos perecederos como alimentos y medicinas.
- Las etiquetas de identificación por radiofrecuencia facilitan el rastreo del movimiento de productos y paquetes a lo largo de la cadena de suministro, brindando mayor visibilidad y control.
- Los dispositivos GPS permiten localizar vehículos y mercancías en tiempo real, lo que mejora la gestión de la flota y la eficiencia en las entregas.

- Las cámaras inteligentes con IA permiten monitorear activos en tiempo real mediante el análisis automático de video. Gracias a la IA, pueden detectar movimientos sospechosos, reconocer objetos o rostros y generar alertas sin intervención humana.

2.11.2. Big Data y analítica

El análisis de *Big Data* consiste en procesar grandes volúmenes de datos complejos para obtener información que respalde la toma de decisiones. Estos datos provienen de múltiples fuentes, como sensores IoT, redes sociales, transacciones y dispositivos inteligentes, y plantean desafíos asociados a las “5 V” del *Big Data*: volumen, velocidad, variedad, veracidad y valor (IBM, 2024).

Para afrontarlos, se utilizan tecnologías específicas como Hadoop y Apache Spark, que permiten el almacenamiento y el procesamiento distribuido a gran escala. Asimismo, las bases de datos NoSQL resultan eficientes para gestionar datos no estructurados. Estas herramientas, junto con plataformas en la nube, facilitan convertir grandes conjuntos de datos en conocimientos accionables.

La analítica de datos se clasifica en cuatro tipos principales:

- Analítica descriptiva: se centra en entender qué ha ocurrido, mediante el análisis de datos históricos.
- Analítica diagnóstica: busca identificar las causas de eventos pasados, respondiendo al por qué de los mismos.
- Analítica predictiva: utiliza modelos estadísticos y de aprendizaje automático para anticipar eventos futuros.
- Analítica prescriptiva: ofrece recomendaciones sobre acciones a tomar, basándose en los resultados de los análisis anteriores.

Estas técnicas permiten descubrir patrones, correlaciones y tendencias dentro de sus datos, optimizando procesos y mejorando la eficiencia operativa.

2.11.3. Automatización

La automatización del almacén mejora los resultados operativos mediante el uso de tecnologías. Puede ser digital o física.

La digital utiliza software para optimizar tareas manuales, como la gestión de inventario, y se destaca por su bajo costo y fácil implementación, por ejemplo mediante escáneres móviles de códigos de barras. La física incorpora equipos más avanzados, como robots móviles y sistemas de transporte automatizado, adecuados para operaciones de mayor volumen. Ambas permiten reducir tareas repetitivas, mejorar la eficiencia, disminuir errores y aumentar el rendimiento del almacén.



3. METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos del proyecto y fundamentar las propuestas técnicas, se desarrolló un enfoque metodológico basado en análisis comparativos, dimensionamientos ingenieriles y evaluación multicriterio. Una matriz multicriterio es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones que permite comparar varias alternativas evaluándolas según más de un criterio al mismo tiempo. Se utiliza cuando una decisión no puede basarse en un único factor (por ejemplo, solo costo o solo eficiencia), sino que requiere integrar múltiples dimensiones.

Posteriormente, se efectuó el dimensionamiento técnico del almacén mediante cálculos de superficie útil, distribución funcional, alturas operativas y capacidad de almacenamiento. Se utilizaron datos de fabricantes, normativa vigente y recomendaciones técnicas para definir módulos, pasillos, separaciones y configuraciones geométricas. Asimismo, se analizaron alternativas de manejo de materiales (AGVs, transelevadores y estaciones de *picking* robotizado) y se modeló la integración digital mediante SAP EWM y un WCS. Finalmente, se establecieron indicadores de desempeño (KPIs) y se evaluó el impacto de cada decisión sobre capacidad, eficiencia energética, costos y trazabilidad, empleando matrices de correlación y herramientas de analítica avanzada para sustentar los resultados y validar la coherencia del diseño propuesto.



4. DESARROLLO

4.1. Análisis del lote disponible en el Parque Industrial Aurel

El diseño del almacén frigorífico se desarrollará en un lote de 2000 m² ubicado dentro del nuevo Parque Industrial Aurel, en el partido de General Pueyrredón. La elección de este emplazamiento responde tanto a su localización estratégica como a las condiciones de infraestructura disponibles, que resultan adecuadas para el tipo de operación prevista.

4.1.1. Dimensiones y superficie útil

Conforme a la normativa vigente dentro del Parque Industrial Aurel mencionada en el Marco Teórico, se establece un FOS máximo de 0,5 para el lote destinado al proyecto. En función de esta restricción, y considerando que el predio cuenta con una superficie total de 2.000 m², la superficie cubierta máxima admisible en planta baja es de 1.000 m². Ésta debe contemplar no solo el área destinada específicamente al almacenamiento frigorífico, sino también las zonas funcionales complementarias del edificio, tales como oficinas, sanitarios, vestuarios, áreas técnicas y espacios destinados a carga y descarga. Se prevé un sector destinado a la playa de maniobras para los camiones que ingresen y egresen con mercadería del predio, junto con un área adicional para el estacionamiento de vehículos del personal y visitantes. Cabe destacar que estos espacios serán descubiertos, por lo cual no se incluyen dentro de los 1.000 m² de superficie cubierta proyectada.

Adicionalmente, la normativa del Parque Industrial Aurel establece una altura máxima permitida de hasta 15 metros para edificaciones industriales, lo cual permite la implementación de estanterías de alta densidad y sistemas automatizados de manipulación de pallets.

4.1.2. Zonificación operativa del almacén

La zonificación operativa del almacén frigorífico se organizará en ocho áreas funcionales principales: carga y descarga; recepción y control; almacenamiento propiamente dicho; preparación de pedidos; expediciones y salida; oficinas y servicios; zonas técnicas especiales y una zona específica destinada a los módulos de refrigeración. Esta segmentación responde a criterios operativos de eficiencia, continuidad de la cadena de frío y adecuada separación funcional, conforme a los lineamientos establecidos en el marco teórico.

Dentro de los 1.000 m² disponibles para la ocupación en planta baja, la superficie se distribuirá proporcionalmente conforme a las exigencias técnicas de un centro logístico frigorífico orientado al almacenamiento de productos congelados (Figura 1).

Las áreas de carga y descarga, recepción y control, junto con expedición y salidas, ocuparán en conjunto el 20 % de la superficie total (200 m²). Esta zona se organiza a partir de los muelles de carga y descarga, a través de los cuales ingresa o egresa la mercadería mediante cintas transportadoras. El espacio se dimensiona para permitir la operación de autoelevadores y la conexión con los transportadores motorizados. Asimismo, la zona contempla sectores destinados a la verificación de ingreso, inspección de calidad, control documental y trazabilidad de la mercadería recibida. Del mismo modo, en este espacio se desarrollan las operaciones de expedición y despacho, garantizando una salida ordenada y controlada de los productos terminados.

La zona de almacenamiento propiamente dicha será la de mayor superficie, con un 50 % del total (500 m²), e incorporará estanterías metálicas de alta densidad. La zona de preparación de pedidos (*picking*) abarcará un 7 % (70 m²), destinada a fraccionamiento, clasificación y consolidación de productos.

Las oficinas administrativas, vestuarios, sanitarios y servicios auxiliares representarán un 7 % (70 m²), y estarán ubicadas estratégicamente con vistas operativas y accesibilidad desde el exterior. Las zonas técnicas especiales, que incluyen la sala técnica, tableros eléctricos, área de mantenimiento y carga de baterías, ocuparán un 8 % (80 m²).

Finalmente, se destinará un 8 % adicional (80 m²) a la zona de módulos de refrigeración, la cual alojará los equipos necesarios para mantener las condiciones térmicas internas del recinto. Esta área será separada funcionalmente del resto, con acceso técnico independiente, y su ubicación garantizará eficiencia en la distribución frigorífica, minimizando pérdidas energéticas y facilitando tareas de mantenimiento preventivo.



Figura 1: Zonificación del almacén
Fuente: Elaboración propia, 2025



4.2. Diseño del almacén

El diseño del almacén frigorífico automatizado busca optimizar el uso del espacio disponible, garantizar la continuidad de la cadena de frío y permitir una operación eficiente y segura mediante la integración de tecnologías avanzadas de almacenamiento y manipulación.

La planificación considera aspectos estructurales, operativos y normativos, incluyendo la selección del sistema de estanterías, los equipos de manejo de materiales y la disposición general del *layout*, asegurando la compatibilidad entre todos los componentes del sistema.

4.2.1. Selección del sistema de estanterías

La elección del sistema de estanterías para el almacén frigorífico automatizado se basa en un conjunto de criterios técnicos, operativos y normativos que aseguran la eficiencia del espacio, la seguridad estructural y la compatibilidad con los equipos de manipulación. En primer lugar, se considera la naturaleza del producto a almacenar y las condiciones de conservación. Al tratarse de alimentos congelados, se requieren estructuras diseñadas para soportar bajas temperaturas, minimizar la pérdida térmica y permitir una alta densidad de almacenamiento, optimizando así el volumen refrigerado.

Otro factor relevante es el grado de automatización previsto. El diseño contempla un almacén inteligente, con mínima intervención humana, por lo que el sistema debe integrarse con tecnologías robotizadas, reduciendo la exposición de los operarios al frío y aumentando la eficiencia operativa.

La capacidad volumétrica también condiciona la selección. La capacidad vertical del sistema depende de la altura útil disponible en el recinto y de la altura operativa de cada módulo, calculada a partir de la suma de:

- La altura del pallet con la carga completa.
- La altura del larguero estructural.
- La holgura de seguridad entre niveles.

Por otro lado, la altura máxima del sistema de almacenamiento se encuentra condicionada por limitaciones normativas y técnicas. El Reglamento del Parque Industrial Aurel establece un plano límite de 15 m, aunque para el diseño debe contemplarse:

- La posible interferencia con instalaciones técnicas en el sector superior.
- El espacio libre obligatorio entre el último nivel de carga y la cubierta de la nave.
- La presencia de conductos de refrigeración, rociadores automáticos, luminarias y bandejas portacables, que reducen la altura útil disponible.
- La necesidad de asegurar una altura operativa mínima, que permita maniobras seguras y eficientes de los equipos de manipulación de materiales.



3.2.1.1. Análisis de espacio y operatividad

Para el diseño del área de almacenamiento, que contará con una superficie total de 500 m², se optará por una configuración rectangular de 15,81 m x 31,62 m (Anexo IV). Esta disposición geométrica permite una organización eficiente de los módulos de estanterías en filas paralelas, optimizando tanto la capacidad de almacenamiento como la circulación interna.

En cuanto a la altura, se aprovechará el máximo permitido por la normativa del Parque Industrial Aurel, que establece una altura total de hasta 15 metros. No obstante, la altura útil efectiva disponible para almacenamiento se verá reducida por la necesidad de destinar un espacio superior a instalaciones técnicas. Además, se debe considerar un margen de seguridad entre el último nivel de carga y la estructura de cubierta. En función de estas restricciones técnicas y operativas, se estima que la altura útil neta para estanterías será de aproximadamente 12 metros.

3.2.1.2. Comparativa de sistemas: *Drive-in, Push-back, Shuttle*

En función de las prioridades definidas para el diseño de un almacén frigorífico inteligente destinado al almacenamiento de productos congelados de alta rotación, se evaluaron cuatro soluciones de estanterías industriales: *Drive-In, Push-Back, Pallet Shuttle* y *Pallet Shuttle*.

Automatizado. La elección final debe contemplar no sólo la capacidad de compactación, sino también la eficiencia operativa, la adaptabilidad a flujos dinámicos de mercadería, el nivel de automatización alcanzable y las condiciones particulares de operación en ambientes a temperatura controlada.

El sistema *Drive-In*, aunque ampliamente utilizado en cámaras frigoríficas por su elevado aprovechamiento volumétrico (hasta un 85% de ocupación), presenta limitaciones significativas en términos de eficiencia operativa. Al requerir que los autoelevadores ingresen dentro de los túneles de carga para manipular los pallets, se incrementan tanto los tiempos de operación como los riesgos de accidentes y daños estructurales. Además, este sistema responde a una lógica LIFO y no permite una buena diversificación de referencias, por lo que resulta poco adecuado en contextos de alta rotación y exigencia logística.

El sistema *Push-Back* representa una mejora respecto al *Drive-In* en términos de seguridad y agilidad operativa, ya que la carga y descarga se realiza desde el frente de la estructura, sin necesidad de ingreso del autoelevador. Sin embargo, su capacidad de almacenamiento en profundidad está limitada (máximo cuatro pallets por canal) y continúa operando bajo el principio LIFO. Esta configuración puede ser útil para productos de rotación media, pero no responde eficientemente a entornos con flujos intensivos ni a estrategias logísticas que priorizan una trazabilidad precisa y dinámica.

En contraposición, el sistema *Pallet Shuttle*, particularmente en su variante automatizada, permite superar las limitaciones mencionadas, integrando altos niveles de compactación con

una operativa altamente eficiente. El uso de un carro motorizado elimina la necesidad de que los autoelevadores ingresen en la estructura, reduciendo los tiempos de carga y descarga, así como los riesgos operativos. Este sistema admite una mayor profundidad de canal (hasta 40 metros) y se adapta perfectamente a los requerimientos de productos congelados con alta rotación, ya que permite asignar diferentes referencias por canal, favoreciendo una lógica de gestión flexible. En su versión automatizada, el sistema se potencia mediante la incorporación de transelevadores o lanzaderas verticales, sumado a un WMS, lo que permite un control total de la mercadería, trazabilidad precisa y reducción sustancial de la intervención humana, mediante conexión WiFi por un operario que opera desde una *tablet*² o consola remota.

En el Anexo I: "Selección del sistema de estanterías" se presenta el cuadro de ponderación de factores, a partir del cual se determina que la opción adecuada para este proyecto es el sistema *Pallet Shuttle* Automatizado.

4.2.2. Selección de equipos de manejo de materiales

Dentro del almacén frigorífico automatizado, el sistema de manejo de materiales fue seleccionado considerando tanto la estantería *Shuttle* como el objetivo de mantener una operación con mínima intervención humana en un entorno de baja temperatura.

Para la zona de almacenamiento propiamente dicha, se utilizarán transelevadores (Figura 2) que se desplazan a lo largo de los pasillos, con una capacidad de elevación superior a 40 metros y un ancho de pasillo reducido (entre 1,5 y 1,6 m). Una vez que el pallet es ubicado en el ingreso del canal, interviene el carro *Shuttle* (Figura 3), que lo traslada automáticamente hasta la primera posición disponible. Este conjunto permite un almacenamiento de alta densidad, completamente automatizado, sin necesidad de ingreso de carretillas ni operarios a la cámara.



Figura 2: Transelevador
Fuente: Mecalux, 2023

² Es un término en inglés que se utiliza para designar un dispositivo electrónico portátil con pantalla táctil.



Figura 3: Carro Shuttle Automatizado

Fuente: Mecalux, 2025

En la zona de carga y descarga de camiones se establecerá una interfaz entre el transporte externo y el sistema automatizado, permitiendo la recepción directa de pallets. Para la llegada de la mercadería se empleará un sistema automatizado con horquillas (figura 4), que permite la carga y descarga de pallets de manera automática.

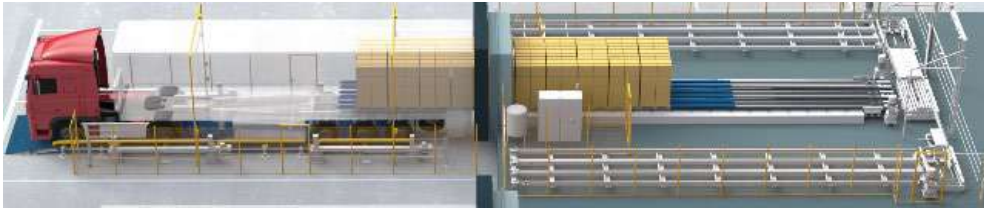


Figura 4: Sistema automatizado con horquillas para carga y descarga

Fuente: WDX, 2023

Luego, los pallets serán trasladados mediante líneas de transportadores motorizados hacia el área de espera (Figura 5), desde donde los AGVs los recogerán y transportarán hasta la *transfer station*, que funciona como el punto central de conexión. En esta estación, los pallets se reciben, se organizan y se envían hacia las estanterías correspondientes o hacia las estaciones de preparación de pedidos, asegurando un flujo continuo, eficiente y controlado de la mercadería dentro del almacén.



Figura 5: Líneas transportadoras

Fuente: WDX, 2023

Para la manipulación de la mercadería se emplearán AGVs con horquilla (Figura 6), que permitirán la recepción directa de los pallets. Estos sustituirán a las carretillas retráctiles

tradicionales y están diseñados para optimizar los recorridos mediante navegación inteligente. Las carretillas retráctiles requieren pasillos de entre 2,7 y 3 metros de ancho, mientras que los AGV para pallets pueden operar en pasillos estrechos, de aproximadamente 1,2 a 1,8 metros, optimizando así el uso del espacio.

Para garantizar la máxima precisión en la operación, se empleará un sistema de navegación de última generación basado en LiDAR 3D³ con *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM⁴), complementado con visión artificial e Inertial Measurement Unit (IMU⁵). Esta tecnología permite al AGV localizarse y desplazarse con exactitud en pasillos estrechos, adaptarse a cambios en el entorno y asegurar una transferencia confiable de los pallets hacia el sistema *Shuttle*.



Figura 6: AGV para pallets
Fuente: Robot magazine, 2025

Para las operaciones de picking se emplearán AGVs, que trasladarán los pallets desde los extremos de los transportadores hasta las estaciones de trabajo. Allí, un sistema robotizado con inteligencia artificial (Figura 7) utilizará visión artificial para identificar productos, calcular trayectorias optimizadas y determinar el mejor agarre. Esta tecnología permite manipular productos de distintos tamaños y formas, con alta precisión y adaptabilidad. Además, gracias al aprendizaje automático, el sistema puede ajustar su desempeño y mejorar continuamente.



Figura 7: Robot de picking
Fuente: Mecalux, 2024

³ Es un sensor que emite pulsos de luz láser para medir distancias y generar un mapa tridimensional del entorno.

⁴ Es un algoritmo que permite al AGV construir un mapa del entorno mientras se localiza dentro de él en tiempo real.

⁵ Es un conjunto de sensores (acelerómetro, giroscopio y a veces magnetómetro) que mide el movimiento, orientación y aceleración del AGV. Ayuda a mantener la localización y estabilidad cuando LiDAR o visión tienen interferencias o pérdidas temporales de señal.

Por último, para tareas de inspección, control o mantenimiento correctivo también se contará con AGVs para acceder a zonas específicas del sistema en caso de paradas no programadas o incidentes. En el caso particular de los carros *Shuttle*, el procedimiento de mantenimiento contempla que el transelevador retire el equipo desde el canal y lo traslade hasta la *transfer station*. Allí, el *Shuttle* es transferido a un AGV, que se encarga de llevarlo al área técnica destinada a reparaciones y revisiones, asegurando así una rápida intervención sin afectar la continuidad del flujo general de la operación.

3.2.2.1. Condiciones de operación en frío

El frío tiene un impacto en los sistemas de *Shuttle* Automatizado, pero estos están diseñados para operar en almacenes congelados (hasta -30°C). El frío extremo puede afectar los materiales de construcción del *Shuttle*, como los plásticos y cauchos, que pueden volverse quebradizos o menos flexibles a temperaturas muy bajas.

Los lubricantes y aceites que se utilizan en los motores y mecanismos del *Shuttle* pueden volverse espesos o incluso solidificarse, lo que dificulta el movimiento y puede causar desgastes prematuros o fallos en los componentes mecánicos (KNAPP, 2023).

Además, las baterías enfrentan una disminución de su capacidad y eficiencia debido al enlentecimiento de las reacciones químicas internas, lo que reduce la autonomía y prolonga los tiempos de carga (Moko Energy, 2024).

Para mitigar estos efectos, los ingenieros seleccionan materiales específicos con tolerancia a temperaturas bajo cero. Por ejemplo, se emplean polímeros de ingeniería como el Poliéter éter cetona o el Poliamida 6.6 reforzado con fibra de vidrio, que mantienen su resistencia mecánica en frío extremo. En el caso de elementos flexibles y de sellado, se utilizan elastómeros de silicona o Etileno-Propileno-Dieno Monómero de grado criogénico, capaces de conservar su elasticidad hasta -40 °C.

También se implementan lubricantes especiales como las grasas sintéticas de base polialfaolefina y aceites con espesantes de litio complejo o calcio sulfonato, formulados para temperaturas de -40 °C a -50 °C, evitando el endurecimiento de engranajes y rodamientos. Además, algunos fabricantes incorporan sistemas de calefacción localizada, como resistencias eléctricas de baja potencia instaladas en reductores o bandas calefactoras en carcasas de baterías, lo que previene la solidificación de lubricantes y asegura que las baterías de ion-litio o Litio-ferrofosfato trabajen dentro de un rango seguro.

Cuando los carros *Shuttle* no están en funcionamiento, es recomendable que no permanezcan dentro del almacén, especialmente si se trata de un ambiente de baja temperatura. Por esta razón, muchos sistemas están diseñados para que los *Shuttles* se retiren automáticamente a zonas de resguardo o mantenimiento con temperatura controlada cuando no están en operación (Mecalux, 2023). En el caso del presente sistema, dicha función se realiza en el área



técnica, donde los equipos pueden mantenerse en condiciones óptimas hasta su próxima operación, prolongando su vida útil y facilitando intervenciones preventivas o correctivas.

4.2.3. Dimensionamiento del almacén

El dimensionamiento del almacén se realizó a partir de las características del pallet, los requerimientos del sistema automatizado tipo *Shuttle* y las restricciones constructivas del edificio. En los apartados siguientes se presentan el diseño del módulo de almacenamiento, el cálculo de la altura y niveles de estantería, la determinación del ancho de pasillos y la disposición final de las estanterías dentro del *layout* del almacén.

3.2.3.1. Módulo de almacenamiento

En este apartado se presenta el diseño del sistema de estanterías, definiendo las dimensiones técnicas del módulo de almacenamiento. El proceso de diseño consideró las características del pallet seleccionado, así como los requerimientos del sistema automatizado tipo *Shuttle*, incluyendo las holguras necesarias para su correcto funcionamiento.

Los cálculos y criterios utilizados para dimensionar el módulo se desarrollan en el Anexo II: Diseño de las estanterías tipo *Shuttle*. Como resultado de este análisis, se estableció que las medidas finales del módulo serán las siguientes:

Módulo de almacenamiento	
Ancho del módulo	1.630,5 mm
Profundidad del módulo	1.000 mm

Tabla 1: Dimensiones del módulo

Fuente: Elaboración propia, 2025

3.2.3.2. Altura y niveles de las estanterías

En este apartado se define la altura total del módulo de almacenamiento, considerando la altura del pallet, el sistema de rodadura del *Shuttle* y la carga útil. También se contemplaron las holguras operativas entre niveles y las recomendaciones del fabricante respecto a la modulación en múltiplos de 50 mm. Si bien la altura máxima de construcción es de 15 m, la altura útil disponible para almacenamiento se limita a 12 m, dado que es necesario reservar espacio para la instalación de ductos de refrigeración, bandejas portacables, iluminación, sistemas contra incendios y tránsito técnico en altura.

Los cálculos detallados se encuentran en el Anexo III: "Cálculo de la altura y niveles de las estanterías". Como resultado, se estableció:



Altura y niveles de las estanterías	
Altura total de la estantería	10,8 m
Cantidad de niveles	5

Tabla 2: Altura y niveles de estantería

Fuente: Elaboración propia, 2025

3.2.3.3. Cálculo del ancho de pasillos

Dado que el sistema de almacenamiento seleccionado corresponde a estanterías tipo *Shuttle* Automatizadas, el transelevador y los carros motorizados constituyen el equipo de manejo de materiales (EMM) principal dentro del almacén. En consecuencia, su integración condiciona

directamente el diseño geométrico del *layout*, particularmente en lo referido a la definición de los pasillos de circulación, tanto longitudinal como transversal. Estos pasillos deben garantizar un desplazamiento seguro y eficiente de los equipos durante las operaciones de carga y descarga en los canales de almacenamiento. Atendiendo a las dimensiones operativas del transelevador, así como a las holguras mínimas requeridas para su funcionamiento autónomo, se adopta un ancho de pasillo de 1.700 mm en ambos sentidos, valor que asegura la compatibilidad con las maniobras previstas y proporciona las tolerancias necesarias en un entorno de operación automatizada.

3.2.3.4. Disposición de las estanterías

Para definir la disposición óptima del sistema de estanterías dentro del área de almacenamiento disponible, se analizaron dos configuraciones posibles: disposición transversal y disposición longitudinal. Los cálculos correspondientes a esta evaluación comparativa se presentan en el Anexo IV: Evaluación de la disposición óptima del sistema de estanterías.

Como resultado del análisis, se determinó que la configuración longitudinal resulta más eficiente, ya que permite una mayor cantidad de posiciones de almacenamiento por nivel.

Disposición estanterías	
Cantidad máxima de calles en el ancho	18 calles
Pallets por canal en profundidad	13 pallets
Total de posiciones por nivel	234 pallets
Total de posiciones en el almacén	1.170 pallets

Tabla 3: Disposición del sistema de estanterías

Fuente: Elaboración propia, 2025

4.2.4. Zona de carga y descarga

La zona de carga y descarga se integra al sector de recepción, control, expediciones y despacho de mercaderías, conformando un único bloque funcional. Este espacio cuenta con una superficie de 15,8 m de ancho por 5,3 m de profundidad. Para las maniobras de los camiones se dispone de un andén abierto conectado a la playa de maniobras, lo que facilita las operaciones de acople y desacople durante las tareas logísticas.

Para las operaciones de carga y descarga, se adopta un andén interior con sector abierto hacia la playa de maniobras, lo que permite que el semirremolque se posicione externamente mientras la plataforma de carga queda contenida dentro de la instalación cerrada. De este modo, se asegura la continuidad de la cadena de frío en la interfase operativa y se protege la mercadería frente a las condiciones climáticas exteriores.

En el interior de esta zona se localizan los muelles de carga y descarga que constituyen la interfaz entre el transporte externo y el almacén automatizado, permitiendo la recepción y despacho de pallets de manera completamente automatizada.

El flujo operativo consiste en:

- El camión se alinea con el muelle asignado mediante sistemas de guiado automatizado.
- A continuación, el sistema automatizado con horquillas realiza la transferencia de los pallets entre el camión y el sistema de almacenamiento.
- Los AGVs con horquilla reciben los pallets desde la cinta transportadora y los conducen al área del sistema *Shuttle*.
- Los carros *Shuttle* trasladan los pallets hacia los canales de almacenamiento dentro del módulo automatizado.
- Para despacho, los AGVs transportan los pallets desde el área de *picking* hasta los muelles de salida, donde se cargan en los camiones.

La cantidad de bocas fue determinada en el Anexo V: "Cálculo de la cantidad de muelles", resultando en dos muelles. Uno es destinado a operaciones de carga y otro a operaciones de descarga, lo que permite garantizar un flujo logístico más eficiente y asegurar la continuidad operativa frente a eventuales contingencias. De acuerdo con las recomendaciones de diseño, y considerando un ancho disponible de 15,81 m, se establece una distancia central de 4 m entre posiciones, a fin de garantizar un espacio seguro y eficiente para las maniobras de los vehículos. Bajo este criterio, la explanada exterior asociada al muelle alcanza una longitud de 35,5 m, permitiendo una correcta aproximación y posicionamiento de los camiones.

Entre dos muelles de carga y descarga debe existir una distancia mínima de 3.700 mm y una distancia óptima de 4.600 mm, medida entre los ejes centrales de cada puerta, lo que permite

que camiones de grandes dimensiones puedan abrir completamente sus puertas y facilita la instalación de abrigo de muelle. En el caso de paredes laterales, se recomienda una distancia mínima de 2.400 mm y óptima de 3.000 mm entre el eje de la puerta y la pared lateral. La planificación de la seguridad en la construcción de muelles de carga es fundamental; por ello, se recomienda dejar un espacio suficiente entre el edificio y la caja del camión para evitar riesgos de aplastamiento. Para lograr esto, se pueden colocar topes de muelle, estructuras metálicas soldadas o guías de camión que faciliten la maniobra y un acople preciso. Otros elementos que mejoran la seguridad son postes de referencia, sistemas de bloqueo manuales o automáticos, semáforos y señalización en la zona de carga (Inkema Sistemas, 2023).

4.2.5. Plano del almacén

El siguiente plano (Figura 8) representa la distribución interna del almacén, incluyendo todas las posiciones de almacenamiento disponibles.

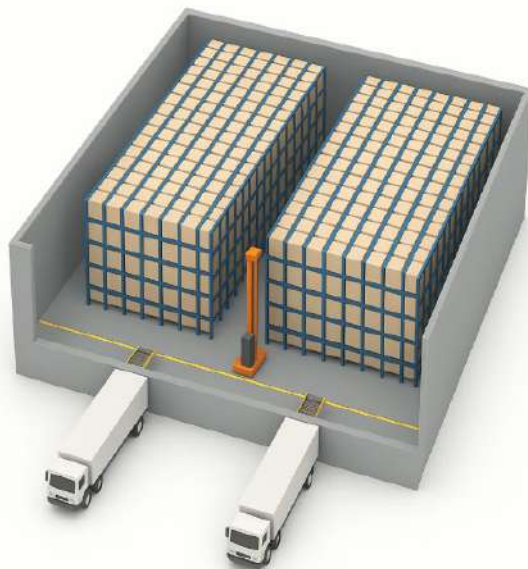


Figura 8: Plano del almacén
Fuente: Elaboración propia, 2025

4.3. Evaluación de sistemas de refrigeración

En la evaluación comparativa de sistemas de refrigeración industrial se analizaron las alternativas amoníaco (NH₃), HFCs y dióxido de carbono (CO₂), en configuraciones transcritical y subcritical, cada una con características técnicas y ambientales diferenciadas. La selección se realizó mediante una matriz multicriterio que evaluó seguridad, impacto ambiental, eficiencia y compatibilidad técnica. El CO₂ obtuvo el puntaje más alto por su clasificación A1, su impacto

ambiental mínimo (GWP = 1, ODP = 0), su buen rendimiento en baja temperatura y su adecuada viabilidad normativa. La matriz completa se presenta en el Anexo VII “Selección del refrigerante”.

Para un almacén de 500 m² en zona semiresidencial, el CO₂ constituye la opción más segura y sostenible, además de ser compatible con configuraciones compactas. Aunque su costo inicial es mayor debido a los equipos de alta presión, estas exigencias se compensan con ventajas operativas y ambientales que justifican la inversión.

En este proyecto se adopta un sistema CO₂ transcrito porque ofrece una mayor flexibilidad operativa que el subcrítico. Mientras que los sistemas subcríticos trabajan completamente por debajo del punto crítico del CO₂, permitiendo aplicaciones eficientes, pero más acotadas, la tecnología transcrito puede operar tanto en condiciones subcríticas como supercríticas. Esto permite sostener un rendimiento estable frente a variaciones amplias de temperatura exterior y resulta especialmente adecuado para cámaras de congelado sometidas a demandas térmicas variables.

4.3.1. Equipos de refrigeración necesarios

Para un sistema de refrigeración industrial con CO₂ transcrito, el conjunto se divide en dos zonas principales: el módulo central ubicado en la sala de máquinas y los elementos dentro del almacén refrigerado.

En la sala de máquinas se instala la central frigorífica, que contiene los compresores (en etapa *booster*⁶ o paralelos), el eyector, las válvulas de expansión electrónicas, el sistema de regulación de alta presión, los intercambiadores de calor, el subenfriador, el panel de control inteligente y componentes auxiliares como acumuladores, separadores de aceite, filtros y sensores.

Este módulo se conecta mediante *tubing*⁷ aislado a los equipos dentro del almacén, donde se instalan:

- Evaporadores colgantes: intercambiadores de calor con ventiladores axiales que soplan aire frío hacia el espacio. Se colocan suspendidos del techo o sobre estructuras elevadas.
- Válvulas de expansión: regulan el flujo de CO₂ líquido hacia los evaporadores. Pueden estar integradas al equipo o instaladas cerca.
- Sensores de temperatura y humedad: permiten monitorear el ambiente y ajustar parámetros en tiempo real.

⁶ Es un término en inglés que refiere a la etapa intermedia de compresión en sistemas de dos etapas, donde los compresores elevan la presión del gas de baja temperatura antes de enviarlo a los compresores de alta, mejorando la eficiencia del sistema.

⁷ Es un término en inglés que se utiliza para designar conductos o tubos flexibles empleados en instalaciones industriales, generalmente para transportar fluidos o gases.

- Bandejas de condensados y drenajes: recogen y evacuan el agua producida por la condensación en los evaporadores.
- *Tubing* aislado: conecta los evaporadores con la sala de máquinas, transportando refrigerante en distintas fases.

En un almacén con 15 metros de altura total, al instalar evaporadores industriales estándar, como el modelo AKH-NY-2 250 de Intarcon, que mide aproximadamente 2.530 mm de largo, 1.030 mm de ancho y 720 mm de alto, dejando el espacio técnico recomendado de 80 cm entre el techo y el equipo, la estructura queda suspendida a 1,52 m del techo.

Además, se sugiere reservar al menos 1 m de despeje entre la carga máxima y el evaporador, junto con márgenes laterales de 50 cm para válvulas, *tubing* y mantenimiento. Por lo tanto, queda libre una altura de 12 m para las estanterías.

Cabe destacar que, para elegir estos equipos, se consideraron tanto las especificaciones técnicas de los fabricantes como las normativas internacionales y nacionales aplicables. En particular, se tuvieron en cuenta las normas ASHRAE 15 y 34, que regulan la seguridad, clasificación y manejo de refrigerantes como el CO₂.

4.3.2. Recolección de datos técnicos

Danfoss es un referente global en componentes para refrigeración, con fuerte presencia en sistemas CO₂ transcíticos. Ofrece soluciones de alta gama como válvulas electrónicas, eyectores y controladores inteligentes, utilizadas en centrales frigoríficas con compresores Dorin, Bitzer o Copeland, aptas para media y baja temperatura (Danfoss, 2025).

Entre sus productos destaca la unidad condensadora Optyma™ iCO₂, diseñada para facilitar la transición a refrigerantes naturales de muy bajo GWP como el CO₂. Cumple con normativa PED 1 y opera eficientemente hasta 46 °C, integrando compresores de velocidad variable y conectividad CAN bus. Puede funcionar de forma autónoma o conectada a sistemas de gestión centralizados, permitiendo alimentar varias cámaras frigoríficas desde una sola unidad.

Por otro lado, Epta Latam, a través de su marca Costan, se ha consolidado como un referente en soluciones de refrigeración con CO₂ transcítico en América Latina, con una fuerte presencia en Argentina. A partir de 2021, Epta comenzó a fabricar centrales frigoríficas de CO₂ transcítico en su planta de Rosario, lo que permite adaptar sus productos a las condiciones locales y ofrecer una respuesta ágil en términos de soporte técnico y logística.

Entre sus líneas de productos se destacan la ECO₂Middle (Figura 9), orientada a tiendas de tamaño medio, con rangos de potencia de 35 a 121 kW para media temperatura y de 5,5 a 52 kW para baja temperatura; la ECO₂Compacta, pensada para tiendas pequeñas y de proximidad, con potencias que van de 15 a 45 kW en media temperatura y hasta 9 kW en baja temperatura;

y la ECO₂Large, diseñada para tiendas medianas y grandes, con capacidades que van de 80 a 180 kW para media temperatura y de 12 a 60 kW en baja.

Todas estas soluciones incorporan tecnologías patentadas como FTE (*Full Transcritical Efficiency*), que permiten mejorar significativamente el rendimiento energético incluso en climas cálidos, reforzando el compromiso de la empresa con la eficiencia y la sostenibilidad (Costan, 2025).



Figura 9: ECO₂Middle

Fuente: Costan, 2025

Intarcon es un fabricante español reconocido por su experiencia en sistemas de CO₂ transcrito, destacando especialmente su serie ECO2CUBE (Figura 10), una solución compacta y modular diseñada para aplicaciones comerciales como supermercados y centros logísticos. Estas centrales ofrecen producción simultánea de frío positivo y negativo en rangos de 30 a 100 kW, y están optimizadas para climas cálidos gracias al uso de compresores paralelos, subenfriadores, eyectores y gas cooler adiabático. Su diseño Plug & Play permite una instalación rápida y sencilla, y cumplen con la normativa F-Gas 2022, garantizando sostenibilidad y adaptabilidad a regulaciones internacionales. En Argentina, IEA Innovaciones Eco-Ambientales actúa como distribuidor autorizado, brindando acceso a los equipos, soporte técnico y asesoramiento especializado.



Figura 10: Central de refrigeración de CO₂

Fuente: Intarcom, 2025

Carel, empresa italiana reconocida a nivel mundial, se especializa en el desarrollo de controladores avanzados para sistemas de refrigeración, siendo un actor clave en la gestión

eficiente de instalaciones con CO₂ transcrito. Aunque no fabrica centrales frigoríficas completas, sus soluciones de control, como la serie pRack transcrito, permiten gestionar de forma integral sistemas booster de CO₂, incluyendo compresores de media y baja temperatura, válvulas de alta presión, eyectores, subenfriadores y gas *coolers*. También ofrece funciones avanzadas como recuperación de calor, control de condensación flotante y sincronización con sistemas de supervisión remota. En Argentina, sus productos están disponibles a través de Supercontrols S.A., distribuidor oficial que brinda soporte técnico y capacitación especializada (Supercontrols, 2025).

4.3.3. Potencia requerida

Considerando una cámara de congelado a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ubicada en un almacén de 500 m^2 con una altura de 12 m , el volumen total a refrigerar asciende a 6.000 m^3 . Utilizando como referencia los valores indicados por la guía técnica de Intarcon para el cálculo de cámaras frigoríficas, que recomienda una potencia entre 45 y 60 W/m^3 para cámaras de congelación, la potencia frigorífica total estimada se ubica en el rango de:

- Mínimo estimado: $6.000\text{ m}^3 \times 45\text{ W/m}^3 = 270.000\text{ W} \approx 270\text{ KW}$ (1)
- Máximo estimado: $6.000\text{ m}^3 \times 60\text{ W/m}^3 = 360.000\text{ W} \approx 360\text{ KW}$ (2)

Este rango cubre las necesidades típicas para una instalación de gran escala, considerando condiciones estándar de aislamiento, rotación de producto y uso. Sin embargo, esta carga puede aumentar significativamente si:

- El aislamiento no es óptimo o presenta puentes térmicos.
- Se almacenan productos con alta carga térmica (ej. carnes, productos frescos sin precongelar).
- Hay alta frecuencia de apertura de puertas o precámaras con poco control de temperatura.

En función de esto, el sistema frigorífico deberá no solo cubrir esa carga térmica de base, sino también disponer de margen de reserva para picos de demanda y garantizar el funcionamiento en climas cálidos.

4.3.4. Matriz comparativa multicriterio

El uso de CO₂ transcrito es una alternativa eficiente para aplicaciones comerciales e industriales. En Argentina, operan tanto empresas locales como filiales o representantes de grupos internacionales, cada una con diferentes niveles de experiencia, capacidad de personalización, soporte técnico y presencia en el país. La siguiente matriz comparativa

multicriterio (Tabla 4) tiene como objetivo analizar y contrastar estas opciones, combinando actores nacionales e internacionales, para facilitar una evaluación técnica y estratégica en la selección de proveedores de sistemas de refrigeración con CO₂.



Los criterios de comparación (C.C.) adoptados son:

- C.C.1: Soporte técnico local y postventa que abarca presencia en el país, personal técnico local, agilidad en respuestas y disponibilidad de repuestos.
- C.C.2: Flexibilidad y personalización del producto que abarca rango de potencias, modularidad e integración con otros sistemas.
- C.C.3: Cumplimiento normativo y sostenibilidad que abarca conformidad con F-Gas, PED, uso de refrigerantes naturales y bajo GWP.
- C.C.4: Experiencia en sistemas con CO₂ transcrito que incluye años de trayectoria, cantidad de instalaciones realizadas, pionerismo en la región.
- C.C.5: Innovación tecnológica que incluye grado de incorporación de tecnologías de vanguardia y participación en proyectos piloto, desarrollos propios, patentes.
- C.C.6: Facilidad de instalación y puesta en marcha que evalúa la simplicidad del montaje, conexiones estandarizadas, diseño *Plug & Play*, documentación técnica clara y necesidad de intervención técnica especializada

Proveedor / Criterio	C.C.1 (20%)	C.C.2 (15%)	C.C.3 (20%)	C.C.4 (15%)	C.C.5 (15%)	C.C.6 (15%)
Danfoss	(4) Presencia global con soporte técnico local. Amplia red de distribuidores. Disponibilidad de repuestos y asistencia técnica capacitada	(4) Ofrece componentes, no sistemas completos. Integrable con distintas marcas, pero requiere integración por terceros.	(4) Cumple PED 1, normativa europea, foco en bajo GWP. Unidad Optyma™ iCO ₂ diseñada para R-744.	(5) Amplia trayectoria global en CO ₂ transcrito. Soluciones instaladas en múltiples regiones y climas.	(5) Desarrollo de eyectores, controladores inteligentes, conectividad avanzada (CAN bus), compresores VS, soluciones de eficiencia energética.	(3) Depende de la integración con otros fabricantes de centrales. Instalación no completamente Plug & Play.
Epta Latam (Costan)	(5) Producción local en Rosario. Soporte técnico argentino. Respuesta ágil y conocimiento	(4) Líneas adaptadas al mercado regional (ECO ₂ Middle o ECO ₂ Large). Modularidad y variedad de potencias. Diseños	(5) Uso de R-744, tecnologías propias para eficiencia (FTE, ETE, XTE). Cumple normativas europeas y locales.	(5) Más de 10 años en Argentina. +42 instalaciones en todo el país. Pioneros en la región desde 2014.	(4) Desarrollo de tecnologías propias enfocadas en rendimiento en climas cálidos. Innovaciones continuas en eficiencia.	(5) Diseño compacto, modular, documentación clara. Instalación ágil.



	o del entorno operativo.	compactos y escalables.				
Intarcon (IEA)	(3) Distribuidor oficial en Argentina. Soporte disponible, pero dependiente del importador.	(4) Equipos modulares (ECO2CUBE), adaptables a proyectos pequeños y medianos. Solución <i>Plug & Play</i> .	(5) Cumple F-Gas 2022. Uso de eyectores, subenfriadores, compresores paralelos. Enfocado en refrigerantes naturales.	(4) Amplia experiencia en Europa. Presencia creciente en Argentina a través de IEA.	(4) Soluciones compactas de alta eficiencia. Uso de gas <i>cooler</i> adiabático, tecnología avanzada para climas cálidos.	(5) Diseño <i>Plug & Play</i> , conexiones estandarizadas de rápida implementación
Carel	(5) Distribuidor con soporte técnico y capacitación local. Especializado en sistemas de control.	(2) No fabrica sistemas completos. Alta flexibilidad en integración de controladores con distintos sistemas.	(5) Soluciones optimizadas para CO ₂ , recuperación de calor, eficiencia energética, cumplimiento de normas internacionales.	(3) Gran experiencia internacional en control, pero no en plantas frigoríficas completas.	(5) Controladores como pRack, integración total con sistemas CO ₂ , funciones avanzadas: condensación flotante, monitoreo remoto, etc.	(3) La instalación depende del integrador. No ofrece soluciones llave en mano.

Tabla 4: Matriz comparativa de proveedores

Fuente: Elaboración propia, 2025

Del análisis comparativo multicriterio realizado, se concluye que Epta Latam se posiciona como la opción más robusta, con un puntaje total de 4,70, destacándose por su producción local, soporte técnico ágil y soluciones adaptadas a las condiciones regionales. En segundo lugar, se encuentran Danfoss e Intarcon (IEA), ambos con un puntaje de 4,15. Danfoss sobresale en innovación tecnológica y trayectoria global, aunque depende de integradores externos para el sistema completo. Intarcon, por su parte, ofrece soluciones compactas y de fácil instalación, aunque con un soporte técnico más limitado en el país. Finalmente, Carel alcanza un puntaje de 3,95, destacando por su experiencia en control y eficiencia energética, pero con una oferta limitada al no fabricar centrales completas.

4.3.5. Resultado matriz comparativa multicriterio

Dado que la potencia frigorífica requerida para el almacén se encuentra en el rango de 270 a 360 kW, nos enfrentamos a una aplicación de refrigeración industrial de gran escala, que supera ampliamente las capacidades individuales de las líneas estándar ofrecidas por fabricantes como Costan o Intarcon.

Ante esta situación, una solución viable consiste en instalar múltiples módulos en paralelo, lo que permite:



- Ampliar la capacidad total del sistema para satisfacer los requerimientos del proyecto.
- Optimizar la operación mediante modularidad, asegurando mayor eficiencia, flexibilidad y redundancia operativa.
- Facilitar tareas de mantenimiento sin comprometer completamente la operación del sistema.

Este enfoque modular no solo es técnicamente factible, sino que además es común en instalaciones industriales de gran envergadura, donde se priorizan la escalabilidad y la continuidad operativa (Tecniservicios, 2025).

Se optó por la solución provista por Costan, seleccionando el modelo ECO₂Large. Esta elección responde tanto a su capacidad técnica, como a su fabricación local en Rosario, lo que garantiza una mayor disponibilidad de equipos, repuestos y soporte técnico especializado. Además, la incorporación de la tecnología FTE permite mejorar el rendimiento energético.

Para alcanzar la capacidad total requerida (entre 270 y 360 kW), se prevé la instalación de tres módulos en paralelo, operando dos en forma simultánea y dejando uno como *backup* rotativo, estrategia que mejora la disponibilidad del sistema y extiende la vida útil de los equipos porque si un módulo falla, los otros dos pueden asumir la carga sin comprometer la temperatura de diseño.

En una configuración en paralelo, los tres módulos se interconectan mediante colectores comunes de aspiración y descarga, formando una única unidad funcional capaz de operar de forma sincronizada o independiente según la demanda térmica.

4.4. Tecnologías 4.0

En el ámbito de la refrigeración industrial, la automatización garantiza el control eficiente de los procesos térmicos, aumentando la seguridad de la instalación y permitiendo el desarrollo de sistemas cada vez más complejos. En este tipo de instalaciones, resulta indispensable para la puesta en marcha y el monitoreo integral de todos los equipos del circuito térmico.

Por ello, se proponen la incorporación de tecnologías 4.0 orientadas a la gestión integral y automatizada del almacén frigorífico, incluyendo un WMS de última generación, integración nativa con el sistema ERP corporativo, plataformas de control de flujo de materiales, sensores IoT para el monitoreo continuo de condiciones críticas, sistemas de identificación y trazabilidad, y herramientas de analítica avanzada para optimizar la toma de decisiones en tiempo real.

4.4.1. Propuesta de sistema de gestión digital del almacén

Para un almacén frigorífico automatizado de 500 m² equipado con sistema Pallet *Shuttle*, se destacan tres soluciones WMS líderes en el mercado.

En cuanto a soluciones internacionales con presencia local, el sistema *SAP Extended Warehouse Management (EWM)* es una solución avanzada para la gestión de almacenes automatizados, diseñada para optimizar cada etapa del flujo logístico: desde la recepción de mercancías hasta el despacho final.

Su arquitectura permite una integración directa con sistemas AS/RS, *Shuttles*, robots y sensores IoT, lo que lo convierte en una herramienta ideal para entornos de alta complejidad como almacenes frigoríficos automatizados. SAP EWM ofrece funcionalidades como control de inventario en tiempo real, asignación dinámica de ubicaciones, gestión de recursos y visualización 3D del almacén, todo dentro de una plataforma escalable y compatible con SAP S/4HANA.

En Argentina, su implementación se realiza a través de *partners*⁸ certificados como Netlogistik y Stratesys, quienes adaptan la solución a las necesidades locales y normativas específicas del sector logístico y alimentario.

Por otra parte, el sistema Infor WMS es una solución avanzada y escalable para la gestión de almacenes automatizados, ideal para operaciones frigoríficas con sistemas *Pallet Shuttle*. Su arquitectura permite una integración fluida con tecnologías AS/RS, robótica, sensores IoT y visualización 3D, lo que facilita el control en tiempo real del inventario, la trazabilidad por lote, la gestión de pedidos y la optimización de recursos.

Además, ofrece funcionalidades como planificación de olas, secuenciación inteligente de tareas, facturación 3PL y análisis de productividad por operario o equipo.

En Argentina, Infor WMS está disponible a través de *partners* como Grupo Novatech, quienes ofrecen implementación local, soporte técnico en español y adaptación a normativas nacionales

Por último, el sistema Easy WMS de Mecalux, especialmente en su versión integrada con *Pallet Shuttle*, es una solución avanzada para almacenes automatizados que buscan compactación, trazabilidad y eficiencia operativa.

Esta plataforma permite gestionar desde una única interfaz tanto el software de gestión como el carro motorizado que opera en los canales de almacenaje, optimizando los ciclos de entrada y salida de pallets. Gracias a su diseño intuitivo, el operario, o el sistema automatizado, puede controlar la lógica de ubicación FIFO o LIFO, visualizar el estado del *Shuttle* (batería, modo de operación) y ejecutar tareas de carga, extracción y recuento sin necesidad de múltiples dispositivos. En Argentina, empresas como La Piamontesa ya han implementado esta tecnología en almacenes refrigerados, logrando una capacidad de más de 2.400 pallets en apenas 700 m², con control total de lotes y fechas de vencimiento mediante *Easy WMS*.

⁸ Término del inglés que refiere a un socio estratégico o aliado comercial que colabora con una empresa en la implementación, adaptación o soporte de una solución tecnológica o de gestión.

4.4.2. Selección de solución WMS e integración con ERP

La solución seleccionada es SAP EWM, ya que ofrece el mayor nivel tecnológico y funcional del mercado, con capacidad para integrarse de forma nativa y completa con SAP ERP. Esta integración garantiza un flujo de información en tiempo real entre las áreas logísticas, administrativas y financieras, sin necesidad de desarrollos adicionales. Si bien Infor WMS y Easy WMS también permiten integrarse con sistemas ERP, lo hacen mediante conectores o desarrollos personalizados, lo que implica mayor complejidad y menor profundidad en la integración. Por ello, SAP EWM se destaca como una opción completa, eficiente y escalable para las necesidades del almacén automatizado. En el Anexo VIII: “Selección del WMS” se encuentra la metodología de comparación utilizada.

SAP EWM puede implementarse en dos modalidades:

- En el modelo centralizado, SAP EWM funciona dentro del mismo entorno que SAP ERP (por ejemplo, en un sistema S/4HANA integrado). Esto simplifica la arquitectura técnica, reduce costos de infraestructura y permite una integración inmediata de datos sin necesidad de interfaces externas.
- En cambio, en el modelo descentralizado, SAP EWM se instala en un sistema independiente del ERP, lo que brinda mayor autonomía, rendimiento y escalabilidad, especialmente útil en operaciones logísticas complejas, automatizadas o distribuidas en múltiples sitios.

Con un solo centro logístico, la modalidad centralizada es suficiente y eficiente. Solo se justificaría pasar a un modelo descentralizado si se planifican futuras expansiones que involucren múltiples ubicaciones que no ocurre en este caso.

4.4.3. Modelado operativo en SAP

Una vez definido el sistema de gestión, se modela el *layout* físico en SAP EWM: zonas de entrada, *buffer*⁹ y canales *Shuttle*. Se definen estrategias de ubicación, reglas de almacenamiento y rutas internas y se configura el *Layout-Oriented Storage Control* (LOSC) para que SAP entienda cómo deben moverse los pallets dentro del sistema.

Cada pallet se representa en SAP como una unidad de manejo (*Handling Unit* - HU), que contiene información detallada sobre su contenido, su número de serie o código único, y su ubicación

actual dentro del almacén. SAP EWM rastrea cada HU desde su ingreso hasta su salida, actualizando su posición en tiempo real a medida que se ejecutan las tareas automatizadas.

⁹ Término en inglés que se utiliza para referirse a un espacio de almacenamiento temporal destinado a equilibrar el flujo de materiales entre procesos o etapas del sistema logístico.

4.4.4. Integración de SAP con los AGVs

Para que SAP EWM pueda interactuar con los AGVs, es necesario contar con un sistema de control de flota (*Fleet Manager* o *Warehouse Control System*) que reciba las órdenes generadas por SAP. Este sistema actúa como intermediario entre el software de gestión logística y los dispositivos físicos, recibiendo las órdenes generadas por SAP EWM, a través del módulo MFS (*Material Flow System*), y traducándose en instrucciones operativas para los AGVs.

La elección entre un *Fleet Manager* y un *Warehouse Control System* (WCS) depende de la complejidad y tipo de automatización del almacén. El *Fleet Manager* está especializado en la gestión y coordinación de flotas móviles autónomas, como los AGVs, optimizando sus rutas y tareas dentro del almacén, lo que lo hace ideal para operaciones centradas en vehículos móviles.

Por otro lado, el WCS ofrece un control integral y en tiempo real de todos los sistemas físicos automatizados, incluyendo transelevadores, cintas transportadoras, carros *Shuttle* y robots móviles. Esto permite una orquestación coordinada de múltiples tecnologías y equipos, garantizando una ejecución fluida de las órdenes que provienen de SAP EWM.

Por lo tanto, para almacenes con sistemas mixtos y alta diversidad de equipos automatizados, un WCS resulta más adecuado. Para que un WCS funcione correctamente, necesita contar con una infraestructura de comunicación robusta que permita conectar y sincronizar todos estos dispositivos en tiempo real.

En la siguiente imagen se muestra de forma esquemática la interacción entre SAP ERP, SAP EWM y el WCS, destacando el flujo de información desde la gestión de órdenes hasta la ejecución física en el almacén.



Figura 11: Interacción entre SAP ERP, SAP EWM y el WCS

Fuente: Elaboración propia, 2025

4.4.5. IoT

En el almacén frigorífico se instalará una red de sensores IoT distribuidos estratégicamente según la fase del proceso logístico, para garantizar el control de condiciones críticas y el seguimiento en tiempo real:

Recepción

- Sensores IoT de temperatura y humedad en el área de descarga para verificar las condiciones de los productos al momento de la recepción.
- Sensores de calidad y estado físico que detectan golpes o vibraciones durante la descarga.
- Sensores en puertas para registrar tiempos de apertura y prevenir exposición prolongada al ambiente externo.

Almacenamiento

- Sensores de temperatura y humedad distribuidos dentro de las cámaras frigoríficas para mantener el rango óptimo (-18 °C o inferior).
- Sensores en equipos de refrigeración (compresores, evaporadores, condensadores) para monitorear vibraciones, consumo energético y ciclos de encendido.
- Sensores de ocupación en estanterías para optimizar la asignación dinámica de ubicaciones.

Picking

- Sensores IoT en zonas de preparación para validar automáticamente la identificación del pallet y condiciones de los productos antes de su consolidación.
- Sensores de pesaje y volumen para confirmar cantidades recogidas.

Despacho

- Sensores IoT en la línea de embalaje para controlar temperatura y humedad en el área de preparación de pedidos.
- Sensores en puertas y muelles para medir tiempos de carga y evitar roturas de la cadena de frío.

Todos estos datos capturados por los sensores IoT serán enviados automáticamente al SAP EWM, donde serán procesados, visualizados y gestionados en tiempo real. A su vez, el WMS estará integrado con el sistema ERP corporativo, lo que permite que las decisiones tomadas a nivel logístico estén alineadas con la planificación de compras, producción, ventas y distribución.

4.4.6. Analítica de datos

Se propone incorporar una plataforma de analítica de datos capaz de realizar reportes en cuatro niveles:

- Analítica descriptiva: identifica qué ocurrió, mostrando datos históricos sobre temperaturas, humedad, errores operativos, tiempos de proceso y eventos relevantes.
- Analítica diagnóstica: determina por qué ocurrió, analizando causas como fallos en equipos de refrigeración, congestión en pasillos o errores en la manipulación de mercancía.

- Analítica predictiva: proyecta qué puede ocurrir, anticipando riesgos como rotura de la cadena de frío, saturación de áreas de *picking* o retrasos en despacho.
- Analítica prescriptiva: indica qué acciones tomar para prevenir o corregir desviaciones, como reconfigurar *layouts*, redistribuir tareas, ajustar rutas de AGVs o programar mantenimientos preventivos.

Esta analítica permitirá no solo entender el comportamiento histórico del sistema, sino también anticipar desvíos antes de que se conviertan en fallos críticos, optimizar la operativa diaria y asegurar el cumplimiento de normativas como HACCP y Codex Alimentarius.

La analítica de datos propuesta se implementará dentro del ecosistema SAP, aprovechando la integración entre SAP EWM, SAP ERP y herramientas avanzadas como *SAP Analytics Cloud* y *SAP Predictive Analytics*.

4.4.7. Mapa de procesos

Este diagrama (Figura 12) permitirá identificar los puntos críticos de la operación. Asimismo, servirá como herramienta base para la detección de riesgos, la definición de indicadores de desempeño y la implementación de mejoras continuas, garantizando que cada etapa esté alineada con los estándares de calidad, seguridad y eficiencia propios de un entorno logístico 4.0.

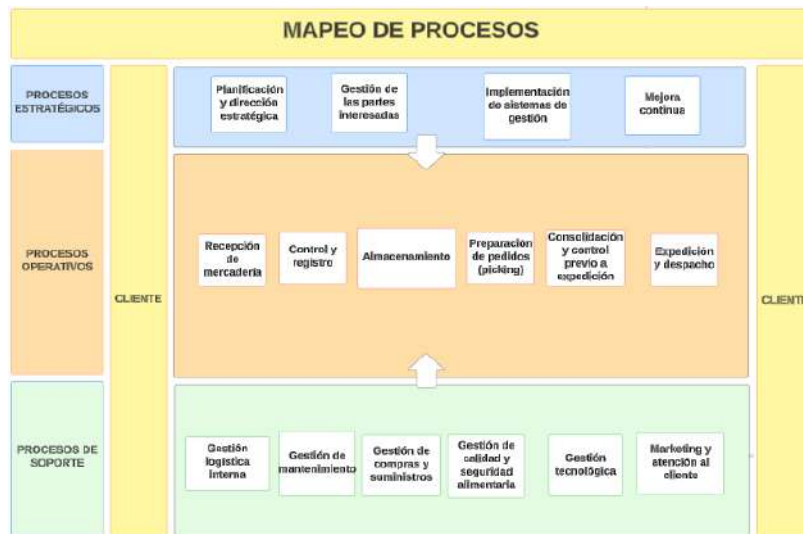


Figura 12: Mapeo de procesos logísticos
Fuente: Elaboración propia, 2025

4.4.8. Definición de indicadores de desempeño (KPIs)

En el contexto de un almacén automatizado gestionado por SAP EWM, los KPIs son esenciales para medir la eficiencia operativa, la precisión en la ejecución de tareas, el uso de recursos tecnológicos y la capacidad de respuesta del sistema ante variaciones en la demanda.

Un KPI efectivo debe cumplir con criterios SMART: ser específico, medible, alcanzable, relevante y limitado en el tiempo. A continuación (Tabla 5), se detallan algunos de los KPIs más relevantes para monitorear el rendimiento de un almacén automatizado gestionado con SAP EWM:

KPI	Descripción	Fórmula	Objetivo
RECEPCIÓN			
Número de incidencias o rechazos en recepción	Mide la cantidad de pallets rechazados o con observaciones durante la inspección inicial de ingreso.	$(\text{Pallets rechazados o con incidencias} / \text{Pallets totales recibidos}) \times 100$	Mantener menos del 5%
Tiempo promedio de descarga	Tiempo desde la llegada del transporte hasta que el producto está en área de inspección medido semanalmente.	$\Sigma(\text{Tiempo descarga}) / \text{N}^{\circ} \text{ de descargas}$	≤ 30 minutos por descarga.
ALMACENAMIENTO			
Precisión del inventario	Nivel de coincidencia entre stock físico y stock registrado en el WMS.	$(\text{Unidades correctas} / \text{Total unidades}) \times 100$	$\geq 97\%$
Consumo energético por pallet	Energía total consumida dividida por pallets almacenados.	kWh / pallet	< 2 kWh / pallet
Utilización del espacio	Porcentaje mensual de ocupación de racks respecto a la capacidad máxima.	$(\text{Espacio ocupado} / \text{Capacidad total}) \times 100$	Entre 85% y 100% de ocupación por mes
Porcentaje de espacio de pasillos	Proporción del área total del almacén ocupada por pasillos de circulación.	$\text{Superficie pasillos} / \text{Superficie total}$	$< 15\%$
PICKING			
Tasa de error en el <i>picking</i>	Porcentaje de pedidos con errores de preparación.	$(\text{Órdenes con error} / \text{Total órdenes}) \times 100$	$\leq 0,5\%$
Tiempo promedio de <i>picking</i>	Tiempo desde que se recibe la orden hasta que se finaliza el armado.	$\Sigma(\text{Tiempo picking}) / \text{N}^{\circ} \text{ de pedidos}$	≤ 20 minutos promedio.
DESPACHO			



Tiempo de inactividad del sistema	Horas en que el sistema automatizado no está operativo (fallas o mantenimiento).	Total de horas no operativas en el mes por fallas no programadas	≤ 4 h / mes
Tiempo medio de ciclo de pedido	Tiempo de ciclo de pedido es el tiempo total que transcurre desde que un pedido es recibido por el sistema hasta que la mercancía correspondiente sale del almacén lista para despacho. Incluye todas las operaciones internas: preparación de pedido, embalaje, verificación y traslado a la zona de salida.	Promedio de tiempo por pedido (minutos)	< 1 hora por pedido

Tabla 5: Indicadores de desempeño

Fuente: Elaboración propia, 2025

Cada uno de estos indicadores debe ser monitoreado periódicamente mediante paneles de control integrados (*dashboards*) en SAP EWM, permitiendo tomar decisiones informadas para la mejora continua de las operaciones logísticas.

3.4.8.1. Impacto de las decisiones de diseño en los KPIs

La evaluación de un almacén de frío de última generación requiere analizar no solo la factibilidad técnica de cada alternativa, sino también el modo en que las decisiones de diseño impactan en los KPIs definidos en torno a cuatro ejes estratégicos: capacidad, eficiencia energética, costos y trazabilidad. Cada solución tecnológica adoptada genera efectos positivos o negativos sobre estos indicadores, lo que permite comparar opciones y determinar su contribución a la competitividad, sostenibilidad y confiabilidad del sistema logístico. A continuación, se presenta una matriz de decisiones de diseño versus KPIs que sintetiza dichos impactos.

Decisión de diseño	Capacidad	Eficiencia energética	Costos	Trazabilidad
Sistema de estanterías (Pallet Shuttle Automatizado)	80% eficiencia volumétrica, mayor densidad de almacenamiento (OKE Storage, 2022)	Menor consumo por reducción de pasillos y movimientos	Reducción de superficie ocupada, inversión inicial elevada	Limitada, requiere integración con WMS para trazabilidad completa
Sistema de refrigeración (CO ₂ transcrito ECO2Large)	No impacta directamente en capacidad	Alta eficiencia en climas templados, bajo GWP (1)	Mayor inversión y mantenimiento, menores riesgos regulatorios	Garantiza continuidad de cadena de frío

Sistema de gestión digital (WMS + ERP+ WCS)	Optimización en ubicación de pallets, reducción de errores	Optimización de rutas internas y tiempos de operación	Reducción de costos por errores y tiempos muertos	Mejora en control de inventario y monitoreo en tiempo real
Integración de Tecnologías 4.0 (IoT, AGVs, Big Data)	Uso dinámico del espacio, optimización predictiva	Monitoreo predictivo de consumo energético	Alto costo de inversión en infraestructura digital y AGVs	Sensores IoT fortalecen la trazabilidad integral

Tabla 6: Evaluación comparativa de decisiones de diseño frente a KPIs

Fuente: Elaboración propia, 2025

Como puede observarse en la tabla, cada decisión de diseño impacta de manera distinta sobre los ejes estratégicos del almacén de frío. Mientras que el sistema de estanterías Pallet Shuttle Automatizado maximiza la capacidad de almacenamiento y reduce costos operativos, requiere de un sistema de gestión digital para garantizar trazabilidad completa. El sistema de refrigeración con CO₂ transcrito ECO2Large destaca por su eficiencia energética y bajo impacto ambiental, aunque supone mayores inversiones iniciales y costos de mantenimiento. Por su parte, la implementación de un WMS integrado a un ERP representa una herramienta clave para optimizar operaciones, reducir errores y fortalecer la trazabilidad en tiempo real. Finalmente, la integración de Tecnologías 4.0 abre la posibilidad de un manejo predictivo del espacio y de la energía, así como de una trazabilidad integral, aunque con una elevada demanda de inversión en infraestructura digital.

Esto refleja que la elección de cada alternativa debe evaluarse de forma integral, equilibrando capacidad, eficiencia energética, costos y trazabilidad para asegurar un desempeño competitivo y sostenible.

A continuación, el gráfico radar permite visualizar el desempeño del almacén frío en estas dimensiones estratégicas. Cada eje representa indicadores críticos.

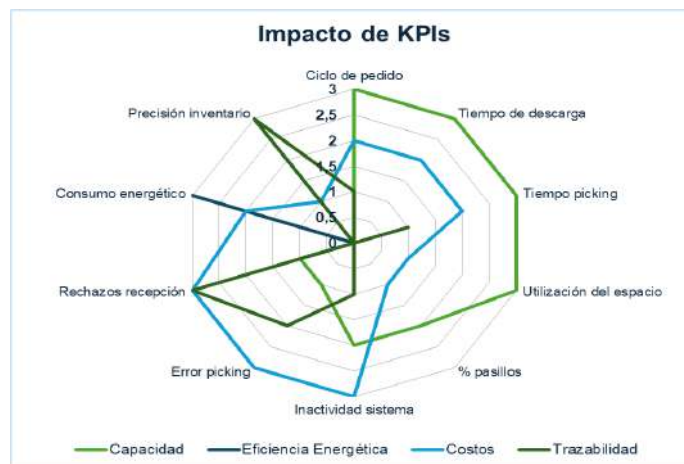


Figura 13: Radar de impacto de KPIs en dimensiones estratégicas

Fuente: Elaboración propia, 2025

El análisis de los KPIs del almacén frío evidencia que la capacidad y los costos son las dimensiones más sensibles, influenciadas por indicadores como tiempo de descarga, utilización del espacio, errores de *picking* e inactividad del sistema, lo que resalta la importancia de optimizar la operación y reducir fallas. La eficiencia energética depende principalmente del consumo energético, indicando que otros factores del almacén aún no se consideran en este eje. Por su parte, la trazabilidad está determinada sobre todo por la precisión del inventario y los rechazos en recepción, mientras que los tiempos de *picking* y la inactividad del sistema tienen un efecto menor.

4.5. Evaluación del impacto de tecnologías 4.0 en la toma de decisiones

La Logística 4.0 mejora significativamente la visibilidad y la transparencia en cada etapa de la cadena de suministro, lo que se traduce en una experiencia satisfactoria para el cliente. Gracias al uso de tecnologías como sensores, rastreo en tiempo real y plataformas digitales, los consumidores pueden acceder a información actualizada sobre el estado de sus pedidos, lo que genera mayor confianza y fidelidad hacia la empresa (Velasco Torres, & Pomárico Ortiz, 2022).

En este contexto, la Industria 4.0 introduce un modelo de “almacenamiento inteligente”, basado en la conectividad, la automatización y el análisis avanzado de datos. Tecnologías como IoT, IA, robótica y análisis de datos permiten transformar los almacenes en centros logísticos interconectados con mayor visibilidad, eficiencia y flexibilidad en la toma de decisiones (*Quality Material Handling* INC, 2025).

La incorporación de tecnologías 4.0 en el diseño del almacén frigorífico representa un cambio estructural en la forma en que se toman decisiones estratégicas, tácticas y operativas. Estas tecnologías permiten transformar datos dispersos y fragmentados en información procesable en tiempo real, mejorando la visibilidad, la trazabilidad y la capacidad de reacción ante eventos críticos (Altertecnica, 2021).

Por su parte, la implementación de sensores IoT integrados al WMS posibilita el monitoreo continuo de variables como temperatura, humedad, ubicación y nivel de stock. Esto permite detectar desviaciones antes de que afecten la calidad del producto, facilitando decisiones correctivas anticipadas y reduciendo pérdidas.

La inteligencia artificial y el aprendizaje automático complementan estas funciones al optimizar los niveles de inventario, anticipar variaciones en la demanda y automatizar la toma de decisiones. De forma paralela, la robótica y la automatización permiten ejecutar tareas repetitivas como el *picking* o el transporte interno con mayor precisión y menores tiempos de ciclo, lo que contribuye a reducir errores humanos y aumentar la productividad (*Quality Material Handling* INC, 2025).



La analítica de datos y el *Big Data*, aplicados al histórico de operaciones del almacén, han transformado la gestión logística. Gracias a estas tecnologías, es posible identificar patrones de comportamiento, cuellos de botella operativos y oportunidades de optimización que antes pasaban desapercibidas (SCM, 2024).

Estas herramientas permiten recolectar y procesar grandes volúmenes de información en tiempo real, lo que facilita una toma de decisiones ágil y precisa. En este contexto, la analítica descriptiva ayuda a entender qué ha ocurrido en el almacén mediante el análisis de datos históricos; la diagnóstica profundiza en las causas de esos eventos; la predictiva permite anticipar la demanda futura, prever roturas de stock y necesidades de mantenimiento; y la prescriptiva recomienda acciones concretas para mejorar la eficiencia operativa (Veconinter, 2021).

Además, permiten optimizar el inventario, reducir costos de almacenamiento, mejorar la distribución del espacio y diseñar rutas de *picking* más eficientes, incluso en almacenes de menor escala que antes no contaban con acceso a este tipo de soluciones tecnológicas (SCM, 2024).

Otro aporte clave de la Industria 4.0 es la digitalización integral de la cadena de suministro, que favorece una mayor visibilidad y coordinación entre los distintos eslabones. La integración de datos en tiempo real entre proveedores, operadores logísticos y clientes permite reaccionar más rápido ante imprevistos, reducir costos asociados a la falta de información y mejorar la capacidad de respuesta frente a cambios de la demanda (Quality Material Handling INC, 2025).

En términos de eficiencia operativa, la automatización de procesos mediante transelevadores, carros *Shuttle* y AGVs reduce la intervención humana, eliminando errores manuales y mejorando los tiempos de respuesta. Como destaca Vinssa (2025), los AGVs optimizan el transporte interno de materiales, eliminan tareas repetitivas, reducen costos laborales, aumentan la seguridad industrial y se adaptan de forma autónoma a su entorno operativo.

Por último, la interoperabilidad entre el WMS y el ERP facilita la toma de decisiones integradas entre áreas de logística, compras, producción y ventas. Esta integración asegura que las decisiones de almacenamiento respondan a la estrategia general de la empresa, alineando las operaciones con los objetivos comerciales, financieros y de sostenibilidad (Salcedo, 2024).

Según SGV Software (2023), la conexión entre WMS y ERP mejora la trazabilidad de los productos, optimiza los niveles de inventario y reduce los errores operativos. Además, Evaluando ERP (2023) destaca que esta sinergia tecnológica contribuye a la sostenibilidad empresarial al permitir una planificación más eficiente de recursos y una reducción de desperdicios. En entornos industriales avanzados, como los que utilizan SAP WMS, esta interoperabilidad también permite implementar estrategias de automatización y análisis predictivo, elevando el rendimiento global de la cadena de suministro (Ramírez, 2023).



5. CONCLUSIONES

Se diseñó un almacén para productos congelados que integra soluciones logísticas y tecnológicas de última generación, optimizando el espacio disponible, asegurando la conservación de la cadena de frío y garantizando la trazabilidad de las operaciones.

En cuanto al sistema de estanterías, la selección del Pallet *Shuttle* Automatizado permitió alcanzar una capacidad de 1.170 pallets en 500 m², lo que representa un incremento aproximado del 80% respecto de sistemas convencionales. Este resultado confirma el cumplimiento del objetivo de maximizar la utilización del espacio cúbico disponible, reduciendo el número de pasillos y, en consecuencia, los costos operativos vinculados al uso de superficie. La decisión adoptada se refleja directamente en los indicadores de capacidad de almacenamiento y eficiencia operativa, al tiempo que mantiene la accesibilidad necesaria para garantizar la seguridad y continuidad del servicio en condiciones de frío extremo. En lo relativo al EMM, la incorporación de transelevadores y AGVs automatizados permitió reducir al mínimo la intervención humana en condiciones de baja temperatura, optimizar los tiempos de operación y aprovechar mejor el espacio disponible. Estas decisiones impactan positivamente en los KPIs de eficiencia operativa y costos, al reducir errores y aumentar la confiabilidad de los procesos. De este modo, se alcanzó el objetivo de definir un sistema de manejo de materiales que incremente la productividad y reduzca riesgos en entornos de bajas temperaturas.

Respecto al sistema de refrigeración, en análisis comparativo de alternativas condujo a la elección de un sistema transcrito CO₂ (ECO₂Large de Costan), el cual se distingue por su elevada eficiencia energética, su bajo impacto ambiental (GWP=1), su diseño modular y la disponibilidad de soporte técnico local. La disposición en tres unidades en paralelo asegura redundancia operativa y escalabilidad, lo que garantiza la continuidad de la cadena de frío aun frente a fallas parciales y permite futuras ampliaciones de capacidad sin comprometer el rendimiento. Sin embargo, este esquema presenta un incremento en los costos de inversión y mantenimiento respecto a soluciones convencionales con HFCs o NH₃, lo que evidencia un *trade-off* entre sostenibilidad ambiental y rentabilidad económica. Con ello se alcanzó el objetivo específico de seleccionar un sistema compacto de refrigeración por CO₂ a partir de un análisis comparativo de ventajas operativas, ambientales y de seguridad.

En el plano de la gestión digital, se propuso la implementación de un WMS integrado con tecnologías 4.0, lo que mejora la trazabilidad, el control de inventarios y la toma de decisiones estratégicas en tiempo real. Este sistema permite la optimización dinámica de ubicaciones, la visualización 3D del *layout*, la interoperabilidad con sistemas ERP y la conexión con dispositivos IoT y sensores de temperatura, asegurando un control integral de la cadena de frío. Asimismo, la integración con AGVs y sistemas de *picking* robotizado garantiza una operativa ágil y segura, reduciendo la intervención humana en entornos de baja temperatura. Estas características se traducen en un impacto directo en los KPIs de trazabilidad y costos operativos, cumpliendo el



objetivo de proponer un sistema digital de gestión de almacenes que incremente la eficiencia, el control y la transparencia de las operaciones logísticas.

Finalmente, la evaluación de las tecnologías 4.0 (IoT, *Big Data*, inteligencia artificial y robótica) demostró su impacto positivo en la reducción de errores, la optimización de rutas de *picking*, la mejora en la calidad del servicio y la flexibilidad operativa. Estas herramientas generan un impacto transversal en todos los KPIs: optimizan la capacidad de almacenamiento mediante un uso dinámico del espacio, mejoran la eficiencia energética mediante monitoreo predictivo, reducen costos operativos al minimizar fallas humanas y fortalecen la trazabilidad con sensores en tiempo real. Con ello, se alcanzó el objetivo específico de evaluar cómo las tecnologías 4.0 mejoran la calidad de la información para la toma de decisiones estratégicas y fortalecen la flexibilidad operativa.

En conclusión, el diseño propuesto no solo cumplió con los objetivos específicos planteados, sino que además demostró, a través de los KPIs (capacidad de almacenamiento, eficiencia energética, costos operativos y trazabilidad), que es posible articular eficiencia operativa, sostenibilidad ambiental y flexibilidad tecnológica en un mismo proyecto. De este modo, se establece una base sólida para responder a las crecientes demandas de la industria del almacenamiento frigorífico y garantizar su proyección futura en términos de competitividad y resiliencia.

Como proyección, se identifican líneas futuras de análisis que no fueron abordadas en el presente trabajo y que podrían enriquecer el diseño integral del sistema. Entre ellas se destacan: el impacto económico de la inversión inicial, como variable crítica para evaluar la viabilidad financiera del proyecto; las posibles limitaciones del sistema de refrigeración por CO₂ en climas cálidos, que podrían condicionar su desempeño y costos de operación; y la ciberseguridad en la integración de tecnologías 4.0, aspecto esencial para garantizar la confiabilidad de los sistemas digitales y proteger la trazabilidad en tiempo real. Estas perspectivas abren el camino a nuevas investigaciones que complementen los resultados alcanzados y refuercen la solidez de las soluciones propuestas.



6. BIBLIOGRAFÍA

- Anaya Tejero, J. (2011). *Logística integral, la gestión operativa de la empresa*. ESIC.
- Altartecnia. (2021). *Refrigeración 4.0: la inteligencia artificial aplicada a la industria del frío*. Disponible en <https://altartecnia.com/refrigeracion-4-0-industria-del-frio/>
- Ar Racking. (2023). *Diferencias entre Estanterías Drive in y Drive through*. Disponible en <https://www.ar-racking.com/es/blog/diferencias-entre-estanterias-drive-in-y-drive-through/>
- Aurel Parq. (2024). *Reglamento Aurel Parq*. Mar del Plata: Aurel Parque Industrial.
- Ballou, R. H. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro* (5ª ed.). Pearson Educación. Disponible en <https://drive.google.com/file/d/0ByfUJmSJI8nlZ1Z4bzB4SXR4bEU/preview?resourcekey=0-F8Ej9FT3OgFXSmsB9crmZw>
- Barleta, E., Pérez, G., & Sánchez, R. (2020). *La revolución industrial 4.0 y el advenimiento de una logística 4.0*. CEPAL. Disponible en <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/fcab7fb0-e1cb-4282-8e11-47f124540dd4/content>
- Bernard, J. (2024). *Cámaras Frigoríficas con Amoniaco*. Disponible en <https://www.josebernad.com/refrigeracion-con-amoniaco/>
- Bernad, J. (2024). *¿Qué es la refrigeración con amoniaco?* Disponible en <https://www.josebernad.com/que-es-refrigeracion-con-amoniaco/>
- BPlan.ai. (2025). *What are the top 7 KPIs metrics of a cold chain business?* BPlan.ai. Disponible en <https://bplan.ai/blogs/kpi-metrics/cold-chain-kpi-metrics>
- Carbó Collbatallé. (2022). *La gestión del stock en el almacén de alimentos a temperatura controlada*. Disponible en <https://jcarbo.com/es/gestion-stock-alimentos-temperatura-controlada/>
- Central revista de Mar del Plata. (2025). *Centros Logísticos*. Disponible en <https://revistacentral.com.ar/centros-logisticos/>
- Chemours. (2025). *Global regulations impacting Freon™ refrigerants*. Freon. Disponible en <https://www.freon.com/en/support/regulations>
- Comisión del Codex Alimentarius. (1993). *Código de Prácticas de Higiene para los Alimentos Precocinados y Cocinados utilizados en los Servicios de Comidas para Colectividades (CAC/RCP 39-1993)*. FAO/OMS. Disponible en https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/contenido/marco/Codex_Alimentarius/normativa/codex/rcp/39-1993s.PDF#:~:text=El%20presente%20c%C3%B3digo%20trata%20de%20los%20requisitos%20de,ancianos%20y%20hospitales%2C%20prisioneros%2C%20escuelas%20e%20instituciones%20similares.



- Costan. (2020). *Epta Argentina entre los protagonistas del innovador centro comercial Gómez Pardo*. Disponible en <https://www.costan.com/es/instalaciones/epta-argentina-entre-los-protagonistas-del-innovador-centro-comercial-gomez-pardo>
- Costan. (2024). *ECO₂Middle*. Disponible en <https://www.costan.com/es/productos/eco2middle>
- Danfoss. (2022). *Unidades condensadoras Optyma™ iCO₂: refrigerante natural compatible con unidades condensadoras* [Folleto técnico]. Disponible en <https://assets.danfoss.com/documents/latest/211811/AD428032179371es-ES0102.pdf>
- Danfoss. (2023). *Normas de seguridad y códigos de edificación*. Disponible en <https://www.danfoss.com/es-es/about-danfoss/our-businesses/cooling/refrigerants-and-energy-efficiency/hfc-phase-down/safety-standards-and-building-codes/>
- Diario del Exportador. (2019). *Cómo calcular el número de muelles necesarios para un almacén*. Disponible en <https://www.diariodelexportador.com/2019/02/como-calcular-el-numero-de-muelles.html>
- Epta Latinoamérica. (2016). *Gracias a Epta Argentina, la tecnología de CO₂ en ciclo transcrito para clima subtropical conquista Sudamérica*. Disponible en <https://www.epta-latam.com/es/newsroom/latest-news/gracias-epta-argentina-la-tecnologia-de-co2-en-ciclo-transcritico-para-clima>
- Evaluando ERP. (2023). *Los cuatro ejes para la e-logística: WMS, SCM, CRM y ERP*. Disponible en <https://www.evaluandoerp.com/sistema-de-gestion/implementar-erp/los-cuatro-ejes-para-la-e-logisticawms-scm-crm-y-erp/>
- Greenhouse Gas Protocol. (2016). *Global Warming Potential Values*. Disponible en https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf
- IBM (2024). *¿Qué es el análisis de big data?*. Disponible en <https://www.ibm.com/es-es/think/topics/big-data-analytics>
- IBM. (2025). *¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?*. Disponible en <https://www.ibm.com/mx-es/topics/internet-of-things>
- Inditer. (2022). *Refrigeración con NH₃: Su funcionamiento*. Disponible en <https://inditer.es/refrigeracion-con-nh3/>
- Inditer. (2020). *Sistemas de refrigeración por Freón*. Disponible en <http://inditer.es/en/blog/sistemas-de-refrigeracion-por-freon/>
- Inditer. (2020). *Sistemas de refrigeración industrial: Todo lo que necesitas saber*. Disponible en <https://inditer.es/sistemas-de-refrigeracion-industrial/>
- Inkema. Sistemas. (2023). *Consejos prácticos para tus muelles de carga*. Disponible en https://www.inkema.com/images/cms/consejos-prcticos-para-tus-muelles-de-carga.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Intarcon. (2018). *Cálculo de cámaras frigoríficas*. Disponible en [https://www.intarcon.com/pdfs/ES/Calculo de camaras frigorificas.pdf](https://www.intarcon.com/pdfs/ES/Calculo%20de%20camaras%20frigorificas.pdf)



- Intarcon. (2024, abril 19). *Refrigeración con amoníaco (NH₃ – R717)*. Disponible en <https://www.intarcon.com/refrigeracion-con-amoniaco-nh3-r717/>
- Intarcon. (2024). *ECO2CUBE: Central de refrigeración de CO₂ transcrito*. Disponible en <https://www.intarcon.com/producto/eco2cube/>
- Intarcon. (2024). *La importancia de la congelación de alimentos*. Disponible en <https://www.intarcon.com/congelacion-de-alimentos/>
- Intarcon. (2024). *Serie KH – Evaporadores tipo cúbico industrial*. Disponible en <https://www.intarcon.com/pdfs/ES/evaporador-cubico-industrial.pdf>
- Jessica Liu. (2025). *Aprenda la degradación de la batería a partir de causas, efectos y mitigación*. Moko Energy. Disponible en <https://www.mokoenergy.com/es/battery-degradation/>
- Kings Research. (2024). *Mercado de alimentos congelados*. Disponible en <https://www.kingsresearch.com/es/frozen-foods-market-640>
- Mecalux. (2022). *Catálogos de productos*. Disponible en <https://www.mecalux.com.ar/catalogos>
- Mecalux. (2020). *Los depósitos frigoríficos: diseño y automatización*. Disponible en <https://www.mecalux.com.ar/blog/depositos-frigorificos>
- Mecalux. (2023). *Pallet Shuttle*. Disponible en <https://www.mecalux.com.ar/racks-para-pallets/pallet-shuttle>
- Mecalux. (2021). *Pallet Shuttle automático*. Disponible en <https://www.mecalux.com.ar/soluciones-para-almacenamiento/almacen-automatico-para-pallets/pallet-shuttle-automatico>
- Mecalux. (2020). *Sistemas de almacenamiento: ¿cuál necesito para mi almacén?* Disponible en <https://www.mecalux.es/blog/sistemas-de-almacenamiento>
- Mecalux. (2025). *Transelevadores para pallets*. Disponible en <https://www.mecalux.com.ar/almacen-automatico-para-pallets/transelevadores>
- Mecalux. (2025). *Transportadores para pallets*. Disponible en <https://www.mecalux.com.ar/almacen-automatico-para-pallets/bandas-transportadoras>
- Mecalux México. (2024). *Mecalux lanza al mercado un sistema robotizado para picking con la tecnología IA de Siemens* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=H3Ow9PFFj8k>
- Mecalux. (2025). *Sistema WMS de gestión de almacenes*. Disponible en <https://www.mecalux.com.ar/software/wms-sistema>
- Ministerio de Economía de la Nación Argentina. (2025). *Información útil sobre transporte de cargas*. Argentina.gob.ar. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/transporte/vialidad-nacional/transporte-de-cargas/informacion-util>
- Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social. (2003). *Higiene y seguridad en el trabajo: Resolución 295/2003*. Argentina.gob.ar. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resoluci%C3%B3n-295-2003-90396>

- OKE Storage. (2022). *Radio Shuttle, Pallet Shuttle, Sistema automatizado de estanterías para palés*. Disponible en <https://www.okestorage.com/es/lanzadera-de-radio>
- Palazzo, L. (2024). *La logística de frío en Argentina: un nicho con oportunidades*. Disponible en <https://webpicking.com/la-logistica-de-frio-en-argentina-un-nicho-con-oportunidades/>
- Palletways Iberia. (2025). *Preguntas frecuentes sobre el transporte de mercancía paletizada*. Disponible en <https://www.palletways.com/es/blog/2025/06/17/preguntas-frecuentes-sobre-el-transporte-de-mercancia-paletizada/>
- Parola, G. (2025). *Más opciones, mejor futuro: Soluciones industriales con refrigerantes naturales* [Conferencia]. 17ª Jornada de Refrigeración Industrial, Mar del Plata, Argentina.
- Patil, H. (2020). *Pallet storage in EWM (by HU Type)*. SAP Community. Disponible en <https://community.sap.com/t5/supply-chain-management-blog-posts-by-members/pallet-storage-in-ewm-by-hu-type/ba-p/13436443>
- Ramírez, T. (2023). *Mejora de operaciones logísticas en la industria con SAP WMS para una gestión de almacenes eficiente*. Cleverence. Disponible en <https://www.cleverence.com/articulos/sistemas-erp-es/optimizing-warehouse-ops-with-sap-wms-3948261/>
- Rijaya. (2025). *Estanterías Selectivas: Qué son y sus ventajas*. Disponible en <https://rijaya.com/blog/estanterias-selectivas-que-son-y-sus-ventajas/#:~:text=Dise%C3%B1adas%20para%20optimizar%20el%20espacio,de%20acceso%20a%20los%20productos.>
- Rossell, À. (2025). *Tiempo óptimo de carga y descarga de un camión*. Brolla. Disponible en <https://brollafactory.com/es/blog/tiempo-optimo-de-carga-y-descarga-de-un-camion/>
- Salcedo, A. (2024). *Integración de ERP y WMS: Sinergias que impulsan el rendimiento*. Citransport. Disponible en <https://citransport.com.pa/integracion-de-erp-y-wms/>
- SAP. (2024). *¿Qué es un sistema de gestión de almacenes (WMS)?*. Disponible en <https://www.sap.com/latinamerica/products/scm/extended-warehouse-management/what-is-a-wms.html>
- SCM Logística. (2024). *Analítica de datos en la gestión de almacén: las 7 principales aplicaciones*. Disponible en <https://www.scmlogistica.es/analitica-de-datos-en-la-gestion-de-almacen-las-7-principales-aplicaciones/>
- SGV Software. (2023). *¿Puede un WMS conectarse con nuestro sistema ERP para una gestión integral?*. Disponible en <https://sgvsoftware.com/blog/puede-un-wms-conectarse-con-nuestro-sistema-erp-para-una-gestion-integral/>
- Spijkers, A. (2022). *AGV zonder vorken voor pallettransport*. Robot Magazine. Disponible en <https://www.robot-magazine.nl/article/Nieuws/46204-agv-zonder-vorken-voor-pallettransport>
- Supercontrols S.A. (2025). *Controles para refrigeración CAREL*. Disponible en <https://www.supercontrols.com.ar/productos/controles-para-refrigeracion/>



- Swegon. (2023, julio 4). La nueva normativa sobre gases fluorados: Esto es lo que implicará. Blog Swegon. Disponible en <https://blog.swegon.com/es/la-nueva-normativa-sobre-gases-fluorados-esto-es-lo-que-implicara>
- Tecniservicios H Dos Mil S.A. (2022). *Sistemas paralelos en refrigeración*. Disponible en <https://www.tecniserviciosh2000.com/2022/05/sistemas-parelelos-en-refrigeracion/>
- Veconinter. (2021). *Tipos de analítica de datos: descriptiva, diagnóstica, predictiva y prescriptiva*. Disponible en <https://www.veconinter.com/es/blog/tipos-de-analitica-de-datos/>
- Velasco Torres, K. & Pomárico Ortiz, L. (2022). *Análisis de la tecnología blockchain aplicada a la logística de agrocadenas caso de estudio del café en Colombia*. [Monografía de compilación, Universidad Piloto de Colombia Seccional del Alto Magdalena]. <https://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/11950/Tecnologia%20blockchain%20agrocadenas%20del%20cafe%20colombia.pdf?sequence=4>
- Vinssa. (2025). *Automatización de procesos logísticos con robots móviles autónomos MiR*. Disponible en <https://www.vinssa.com/mir/automatizacion-de-procesos-logisticos/>
- WDX. (2023). *Sistema de carga y descarga automática de camiones | Q-LOADER* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=7DTWmzs5tqI>
- World Economic Forum. (2025). *Keeping up with Smart Factories*. Reunión Anual del Foro Económico Mundial 2025. Disponible en <https://www.weforum.org/meetings/world-economic-forum-annual-meeting-2025/sessions/keeping-up-with-smart-factories/>
- World Economic Forum. (2025). *Lift-off for Tech Interdependence?*. Reunión Anual del Foro Económico Mundial 2025. Disponible en <https://www.weforum.org/meetings/world-economic-forum-annual-meeting-2025/sessions/where-next-for-technology-convergence/>

7. ANEXO

7.1. Anexo I: “Selección del sistema de estanterías”

Las cuatro tipologías de estanterías analizadas presentan características adecuadas para su aplicación en un almacén frigorífico. A fin de determinar la alternativa conveniente en función de los requerimientos operativos y espaciales del proyecto, se procederá a la elaboración de un cuadro de ponderación de factores (Tabla I.1).

Los factores considerados para esta evaluación son los siguientes:

- Aprovechamiento volumétrico que se refiere a la capacidad del sistema de estanterías para utilizar eficientemente el espacio tridimensional del almacén, maximizando tanto en superficie como en altura. Un buen diseño debe permitir almacenar la mayor cantidad de unidades posibles sin comprometer la accesibilidad ni la seguridad.
- Automatización implica la integración de tecnologías que permiten operaciones asistidas o totalmente automáticas, como transelevadores, *Shuttles* o sistemas robotizados, lo que reduce errores humanos, mejora la velocidad de procesamiento y optimiza el uso del espacio y los recursos. Además de mejorar la productividad, contribuye a la eficiencia energética y a la disminución de la huella de carbono asociada al movimiento interno de productos. También resulta clave en entornos frigoríficos donde las condiciones extremas afectan negativamente la ergonomía del trabajo y la permanencia del personal debe minimizarse.
- Seguridad operativa considera todos los elementos que garantizan la protección de los trabajadores, el producto y la infraestructura, como estructuras certificadas, protecciones antichoque, señalización adecuada y mantenimiento regular, minimizando riesgos y accidentes.
- Velocidad de operación hace referencia al tiempo que se tarda en acceder, almacenar o despachar un producto; sistemas con acceso directo, como las estanterías dinámicas, ofrecen mayor rapidez frente a estructuras densas como los *Drive-In*.
- Adaptabilidad a alta rotación evalúa qué tan bien responde el sistema ante productos con alta frecuencia de entrada y salida. Estanterías que permiten acceso rápido y directo a las unidades, como las dinámicas tipo FIFO, son ideales para manejar inventarios de alta rotación sin afectar la eficiencia.
- Flexibilidad de referencias por canal se refiere a la capacidad del sistema de estanterías para almacenar diferentes tipos de productos en un mismo nivel o canal. Una alta flexibilidad permite manejar múltiples referencias de producto dentro del inventario, conocidas como *Stock Keeping Units (SKUs)*, sin necesidad de reorganizar constantemente la estructura.



- Inversión inicial considera el costo económico requerido para implementar el sistema de estanterías, incluyendo materiales, instalación, equipos adicionales y posible automatización.

Factor	Peso	<i>Drive-In</i>	<i>Push-Back</i>	<i>Pallet Shuttle</i>	<i>Shuttle Automatizado</i>
Aprovechamiento volumétrico	0,25	5 (1,25)	4 (1)	5 (1,25)	5 (1,25)
Automatización	0,3	1 (0,3)	2 (0,6)	4 (1,2)	5 (1,5)
Seguridad operativa	0,15	2 (0,3)	4 (0,6)	5 (0,75)	5 (0,75)
Velocidad de operación	0,1	3 (0,3)	4 (0,4)	5 (0,5)	5 (0,5)
Adaptabilidad a alta rotación	0,05	3 (0,15)	4 (0,2)	5 (0,25)	5 (0,25)
Flexibilidad de referencias por canal	0,1	2 (0,2)	3 (0,3)	4 (0,4)	5 (0,5)
Inversión inicial	0,05	5 (0,25)	4 (0,2)	3 (0,15)	1 (0,05)
TOTAL	1	2,75	3,3	4,5	4,8

Tabla I.1: Selección de estanterías

Fuente: Elaboración propia, 2025

En términos de aprovechamiento volumétrico, el sistema *push-back* recibe una puntuación levemente inferior debido a que su diseño con rieles y carros móviles ocupa parte del espacio interno y limita la profundidad a pocos pallets por canal, lo que reduce levemente su eficiencia en comparación con los demás. En automatización, el *Shuttle Automatizado* destaca con un 5 por su operación totalmente autónoma e integración con sistemas inteligentes. En cambio, *push-back* y *drive-in*, al ser sistemas manuales o mecánicos sin automatización real, reciben puntuaciones bajas de 2 y 1, respectivamente. En seguridad operativa, *pallet Shuttle* y *Shuttle Automatizado* sobresalen con 5, al reducir la exposición del operario. *Drive-In*, al requerir que el montacargas entre en los canales, presenta mayor riesgo y recibe 2. En velocidad de operación, *pallet Shuttle* y *Shuttle Automatizado* (5) son rápidos por su acceso automático y fluido. En adaptabilidad a alta rotación, *pallet Shuttle* y *Shuttle Automatizado* (5) permiten flujos continuos y rápidos, ideales para productos de alta rotación. *Drive-In* (3) es menos ágil, ya que requiere mayor tiempo de maniobra y solo permite LIFO. En flexibilidad de referencias por canal, *Shuttle-Automatizado* (5) permite alta gestión de múltiples SKUs por software mientras que, *drive-in* (2) es rígido, diseñado para productos homogéneos. Por último, en cuanto a inversión inicial *drive-*



in es el más económico y *Shuttle* Automatizado implica la mayor inversión por su tecnología avanzada.

Según el cuadro de ponderación, la opción con mejor desempeño es el *Shuttle* Automatizado con un puntaje de 4,8 destacándose en automatización, seguridad, velocidad y adaptabilidad, factores clave para un almacén frigorífico.

7.2. Anexo II: “Diseño de las estanterías tipo *Shuttle*”

Una vez seleccionado el sistema de estanterías tipo Pallet *Shuttle*, se procedió al dimensionamiento técnico del módulo de almacenamiento, contemplando tanto las restricciones operativas del sistema como las características geométricas del equipamiento según Mecalux (2023). Este tipo de estantería se clasifica como penetrable de alta densidad, pero con un grado importante de automatización, ya que incorpora un carro *Shuttle* motorizado.

El carro *Shuttle* permite realizar operaciones de carga y descarga sin necesidad de que los autoelevadores ingresen en las calles de almacenamiento, lo cual mejora significativamente la seguridad, la eficiencia operativa y el aprovechamiento volumétrico. Además, mediante sensores de detección, el *Shuttle* posiciona automáticamente los pallets sin dejar espacios vacíos, favoreciendo una compactación de alta densidad. Para el diseño, se requiere incorporar los siguientes elementos estructurales:

- Puntales: sometidos a esfuerzos de compresión y flexión. Deben dimensionarse con la inercia adecuada para garantizar estabilidad.
- Largueros compactos: soportan verticalmente los carriles.
- Carriles de rodadura: guías sobre las que se desplaza el carro *Shuttle*, con altura de 213 mm.
- Centreadores de entrada: facilitan la alineación correcta del pallet al introducirse en el canal.
- Topes de seguridad (*rail-end stops*): limitan el desplazamiento del pallet y del carro, evitando accidentes.
- Soportes interiores y exteriores del carril.
- Cartelas, pies de puntal, placas de nivelación, anclajes y calles de rigidización, según recomendaciones del fabricante (ej. Mecalux).

El sistema admite pallets con ancho máximo de 1.200 mm y profundidades de 800, 1.000 o 1.200 mm. En función de esto, se seleccionó el pallet tipo Arlog, normalizado por IRAM 10016, cuyas dimensiones son:

- Largo (sentido de avance del *Shuttle*): 1.000 mm ± 3 mm
- Ancho (frontal): 1200 mm ± 3 mm
- Altura: 145 mm ± 7 mm
- Carga máxima: Hasta 1500 kg (según tipo de mercadería)

La elección de este pallet es compatible con el carro *Shuttle* y asegura una manipulación segura, sin interferencias con la estructura metálica del rack. En este sistema, los pallets se manipulan perpendicularmente a sus patines (ver Figura II.1), lo cual implica condiciones particulares de apoyo y guiado.

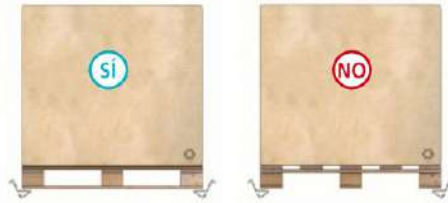


Figura II.1: Manipulación de los Pallets
Fuente: Mecalux

El ancho entre carriles para que se transporte el carro *Shuttle* debe ser 1.000 mm, y en este caso se opta por la configuración de módulo simple, en la cual cada canal contiene una única línea de pallets. La alternativa de módulos dobles se descarta en función del *layout* adoptado y de la necesidad de maximizar la accesibilidad y la eficiencia operativa dentro de la cámara frigorífica. En cualquier caso, el carro *Shuttle* transporta un único pallet por operación, por lo que la elección de módulo simple asegura compatibilidad plena con el sistema y simplifica la gestión estructural.

El ancho total del canal de almacenamiento se define a partir de la suma del ancho frontal del pallet y las holguras mínimas requeridas para garantizar un desplazamiento seguro, evitando fricción con la estructura. Considerando las recomendaciones de Mecalux, la holgura mínima debe ser de 75 mm por lado. No obstante, es frecuente que la carga sobresalga del contorno del pallet. Para contemplar esta situación y asegurar la correcta operación del sistema *Shuttle*, se incorpora un margen adicional de 100 mm a cada lado del canal.

$$\text{Ancho del canal} = 1.200 \text{ mm (ancho del pallet)} + 2 \times 75 \text{ mm} + 2 \times 100 \text{ mm} = 1.550 \text{ mm} \quad (II.1)$$

Esta dimensión es estándar para sistemas *Shuttle*, y permite una correcta circulación del carro, alineación de sensores y protección de la carga.

En cuanto al puntal, se siguieron las recomendaciones de Mecalux (ver Figura II.2) y la distancia entre ambos puntales será de 1.630,5 mm.



Figura II.2: Dimensiones del Módulo
Fuente: Mecalux



La profundidad del módulo de almacenamiento está determinada por el largo del pallet, que en este caso corresponde a 1.000 mm, según las dimensiones normalizadas del pallet tipo Arlog. Esta configuración responde a la lógica de carga del sistema *Shuttle*, en la cual los pallets deben ser introducidos perpendicularmente a sus patines inferiores para permitir el correcto desplazamiento del carro dentro del canal de almacenamiento. Esta orientación asegura la compatibilidad con los carriles de rodadura y la estabilidad del pallet durante las operaciones automatizadas. A efectos de definir la geometría del módulo, se considera que la profundidad nominal del pallet es de 1.000 mm

Profundidad del módulo: 1.000 mm (profundidad del pallet) = 1.000 mm

Con estos parámetros, se determinan finalmente las dimensiones:

Módulo de almacenamiento	
Ancho	1.630,5 mm
Profundidad	1.000 mm

Tabla II.1: Dimensiones módulo de almacenamiento

Fuente: Elaboración propia, 2025

7.3. Anexo III: “Cálculo de altura y niveles de las estanterías”

En primera instancia, se procedió al cálculo de la altura total de la unidad de carga, considerando la suma de los elementos que la componen: el pallet, el sistema de carril y la carga útil. El pallet tipo Arlog posee una altura nominal de 145 mm, mientras que el carril de rodadura del sistema *Shuttle* tiene una altura de 213 mm. Dado que, conforme a las recomendaciones del fabricante (Mecalux), las alturas de cada nivel y la altura total deben ser múltiplos de 50 mm (Ver Figura III.1), se estableció como valor máximo admisible para la carga de mercadería una altura de

1.642 mm, de modo tal que la altura total de la unidad de carga resulte en 2.000 mm (145 mm + 213 mm + 1.642 mm = 2.000 mm).

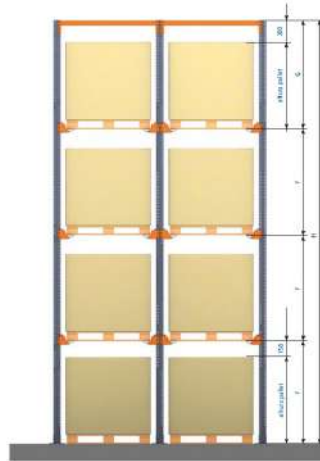


Figura III.1: Alturas por nivel y altura total

Fuente: Mecalux

Una vez definida esta altura unitaria, y considerando que la altura útil disponible en la cámara frigorífica es de 12.000 mm, se procede a determinar la cantidad máxima de niveles apilables dentro del volumen de almacenamiento, teniendo en cuenta las holguras operativas entre niveles y las tolerancias constructivas establecidas:

- Altura de la unidad de carga (pallet + mercadería + carril): 2.000 mm
- Holgura de seguridad por nivel según Mecalux:
 - Niveles intermedios: 150 mm
 - Nivel superior: 200 mm

Entonces, la altura por nivel intermedio: 2.000 mm (carga) + 150 mm (holgura) = 2.150 mm (III.1)

Y para el nivel superior: 2.000 mm (carga) + 200 mm (holgura) = 2.200 mm (III.2)

Finalmente, se puede configurar un sistema de hasta cinco niveles útiles de almacenamiento dentro de los 12.000 mm disponibles:

- 4 niveles intermedios × 2150 mm = 8.600 mm
- 1 nivel superior = 2.200 mm
- Total = 10.800 mm

Esto deja una holgura de 1.200 mm dentro de la altura útil de 12.000 mm, destinada a garantizar márgenes de seguridad y tolerancias constructivas, además de permitir el tránsito técnico en altura para tareas de inspección y mantenimiento. Por su parte, los 3.000 mm restantes hasta alcanzar la altura total de la construcción, que es de 15.000 mm, se reservan para la instalación de equipos de refrigeración, bandejas porta-cables, iluminación y equipos contra incendios.

7.4. Anexo IV: “Cálculo de la profundidad total”

Por otro lado, la profundidad del canal se define según la cantidad de pallets a almacenar en sentido longitudinal y la holgura mínima por unidad de carga. Considerando una profundidad del módulo de 1.000 mm y una holgura mínima de 25 mm por pallet establecida por Mecalux (Ver Figura X), la profundidad total de un canal con n posiciones será:

$$D = (1.000 \text{ mm} + 25 \text{ mm}) \times n = 1.025 \text{ mm} \times n \quad (IV.1)$$

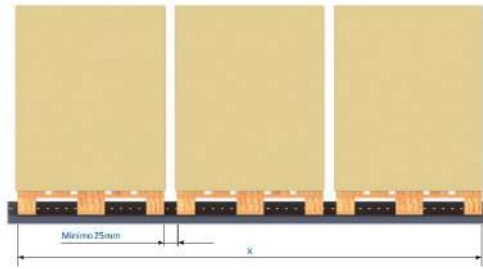


Figura IV.1: Profundidad de los pallets
Fuente: Mecalux

Dado que la disposición final de las estanterías se define en el Anexo IV: “Evaluación de la disposición óptima del sistema de estanterías”, el cálculo detallado de la profundidad total de almacenamiento se presenta en dicho anexo.

7.5. Anexo V: “Evaluación de la disposición óptima del sistema de estanterías”

Para definir la disposición óptima de las estanterías dentro del área de almacenamiento disponible, se evaluaron dos configuraciones posibles: una con orientación transversal y otra con orientación longitudinal, considerando una superficie total de 500 m².

Con el objetivo de alcanzar un diseño geométrico eficiente, se adoptó una proporción rectangular optimizada, en la cual el largo del recinto es el doble del ancho ($2A = L$). Esta configuración es recomendada en instalaciones logísticas automatizadas, ya que favorece la circulación de equipos, mejora el direccionamiento de flujos y permite una mayor densidad de almacenamiento. A partir de esta condición geométrica, se obtuvieron las siguientes dimensiones:

$$\text{Área} = A \times L = A \times 2A = 2A^2 \rightarrow 500 \text{ m}^2 = 2A^2 \rightarrow A^2 = 250 \text{ m}^2 \rightarrow A = \sqrt{250 \text{ m}^2} \quad (V.1)$$

$$A = 15,81 \text{ m} \wedge L = 2A = 31,62 \text{ m}$$

Por lo tanto, las dimensiones útiles del área de almacenamiento son 15,8 m de ancho por 31,6 m de largo.



Dado que el sistema seleccionado es el *Shuttle* Automatizado, se prevé un pasillo frontal longitudinal de 1,7 m, destinado a las *transfer stations* que sirve como zona de transferencia entre los AGVs y los carros, y un pasillo transversal intermedio, también de 1,7 m, que divide el ancho del recinto en dos bloques de estanterías y asegura tanto la circulación del transelevador como la accesibilidad técnica y las rutas de evacuación. Asimismo, se estableció una holgura mínima de 150 mm respecto a las paredes perimetrales, aplicada en ambos extremos del ancho y del largo del recinto por lo que nos quedaría un ancho disponible de 15,5 m y largo de 31,3 m

Configuración transversal: En esta configuración, las estanterías se orientan paralelas al lado menor del recinto (15,5 m). Considerando un ancho de calle de 1.630,5 mm, una profundidad útil de 31,3 m y un pallet de 1.025 mm de fondo (pallet + holgura), se obtienen los siguientes resultados:

Configuración transversal	
Ancho disponible transversal (AD)	15,5 m
Ancho de pasillo transversal (PT)	1,7 m
Ancho útil disponible (AU = AD - PT)	13,8 m
Ancho de cada calle de estantería (AE)	1,6305 m
Cantidad máxima de calles (AU/AE)	8 calles
Largo disponible total en profundidad (LD)	31,3 m
Ancho de pasillo frontal (PF)	1,7 m
Largo útil en profundidad (LU = LD - PF)	29,6 m
Profundidad de cada pallet (pallet + holgura) (PP)	1,025 m
Pallets por canal en profundidad (LU/PP)	28 pallets
Total de posiciones por nivel	224 pallets
Total de posiciones en el almacén	1.120 pallets

Tabla V.1: Configuración transversal

Fuente: Elaboración propia, 2025



Configuración longitudinal: En este caso, las estanterías se orientan paralelas al lado mayor del recinto (31,3 m), y el pasillo operativo se ubica sobre el lado menor (15,5 m). El espacio útil de profundidad se reduce, pero se pueden disponer más calles en sentido longitudinal.

Configuración longitudinal	
Ancho disponible longitudinal (AD)	31,3 m
Ancho de pasillo transversal (PT)	1,7 m
Ancho útil disponible (AU = AD - PT)	29,6 m
Ancho de cada calle de estantería (AE)	1,6305 m
Cantidad máxima de calles (AD/AE)	18 calles
Largo disponible total en profundidad (LD)	15,5 m
Ancho de pasillo frontal (PF)	1,7 m
Largo útil en profundidad (LU = LD - PF)	13,8 m
Profundidad de cada pallet (pallet + holgura) (PP)	1.025 m
Pallets por canal en profundidad (LU/PP)	13 pallets
Total de posiciones por nivel	234 pallets
Total de posiciones en el almacén	1.170 pallets

Tabla V.2: Configuración longitudinal

Fuente: Elaboración propia, 2025

Como resultado del análisis, se determinó que la configuración longitudinal resulta más eficiente, ya que permite una mayor cantidad de posiciones de almacenamiento por nivel. En este caso, se logra una capacidad de hasta 234 pallets por nivel y 1.170 pallets en todo el almacén, optimizando el uso del espacio disponible y favoreciendo la lógica operativa del sistema *Shuttle* Automatizado. Además, esta configuración permite un aprovechamiento casi total del área asignada al almacenamiento, sin afectar la funcionalidad ni la modularidad del sistema de estanterías.

7.6. Anexo VI: “Cálculo de la cantidad de muelles”

En el ámbito logístico, una correcta planificación de los muelles de carga y descarga es esencial para evitar cuellos de botella y garantizar la eficiencia operativa. Según el Diario del Exportador (2019), para calcular el número de muelles necesarios se debe dividir el volumen total de trabajo en minutos entre los minutos disponibles por día.

El volumen total de trabajo en un almacén se refiere al tiempo operativo requerido para atender todas las unidades de carga que deben ser procesadas durante una jornada. Este tiempo no depende únicamente de la cantidad de pallets, sino también de cómo se agrupan y movilizan dentro del sistema logístico. En logística, los pallets no se manipulan de forma individual, sino que se agrupan en unidades mayores como camiones para facilitar el transporte, la carga y la descarga. Por eso, es más preciso reorganizar el cálculo considerando el número de camiones que se requieren para transportar esos pallets. Esto se obtiene dividiendo el volumen diario de pallets por la capacidad de carga de cada camión, y luego multiplicando ese resultado por el tiempo promedio que toma cargar o descargar un camión completo. Así, el volumen total de trabajo se expresa de la siguiente forma:

$$\text{Volumen de trabajo} = \frac{\text{Volumen diario de pallets (Vp)}}{\text{Capacidad de pallets por camión (Cp)}} * \text{Tiempo promedio por camión (Tc)}$$

Los minutos disponibles por día en un muelle representan la cantidad total de tiempo útil que se tiene para realizar operaciones de carga y descarga.

De esta forma llegamos a la fórmula simplificada:

$$M = \frac{Vp * Tc}{Cp * H} \quad (VI.1)$$

Donde:

- Vp: volumen diario de pallets entrantes o salientes (pallets/día)
- Tc: tiempo promedio de operación por camión (horas)
- Cp: capacidad de pallets por camión
- H: horas operativas del muelle por día

Para estimar el Vp, se tiene en cuenta que, en logística de frío, especialmente en productos perecederos como frutas, verduras y pescado congelado, la rotación suele ser alta (Carbó Collbatallé, 2022).

En almacenes de cadena de frío para productos perecederos, la rotación anual del inventario suele estar entre 8 y 12 veces por año (BPLAN, 2025). Si tomamos el extremo superior (12 veces/año), eso equivale a renovar todo el inventario una vez cada 30 días (365 / 12 = 30). En porcentaje diario, esto se traduce en aproximadamente 3,3% de rotación diaria (100 % / 30 = 3,3 %). Aplicado a la capacidad del almacén, con un total de 1.170 posiciones de pallets, el valor de Vp resulta en aproximadamente 39 pallets por día.

En un sistema automatizado, el Tc por camión incluye:

- Alineación del camión al muelle.
- Descarga en la plataforma con horquillas.
- Retiro del camión.



En un sistema tradicional, la descarga manual de un camión puede tardar más de 30 minutos, mientras que los sistemas automatizados realizan la operación en menos de 10 minutos (Brolla, 2025). Para contemplar posibles variaciones y garantizar un margen de seguridad, se considera un Tc por camión de 15 minutos en el cálculo de la cantidad de muelles necesarios.

Con respecto al Cp, la capacidad de un camión estándar para transportar pallets Arlog se determina en función de las dimensiones de la caja del semirremolque y del propio pallet. Según el Ministerio de Transporte de la Nación (2025), las dimensiones máximas permitidas para unidades simples (vehículos sin remolque ni semirremolque) son de 14,20 metros de largo, 2,60 metros de ancho y 4,10 metros de altura, aplicables a vehículos de libre circulación en rutas nacionales sin necesidad de permisos especiales. El pallet Arlog posee dimensiones estándar de 1.200 mm de largo, 1.000 mm de ancho y 145 mm de altura.

Considerando estas medidas, en el largo del semirremolque pueden colocarse 11 pallets, mientras que en el ancho entran 2 pallets, resultando en una capacidad total de 22 pallets por camión.

Por último, dado que el sistema opera 8 horas al día, 7 días a la semana, H se considera como 8 horas.

Con los valores considerados ($V_p = 39$ pallets/día, $T_c = 0,25$ h, $C_p = 22$ pallets, $H = 8$ h), el resultado es: $M=0,055$ muelles.

Esto significa que un solo muelle es suficiente para manejar el volumen estimado, ya que la utilización diaria sería de apenas un 5,5 % de la capacidad de un muelle.

Se recomienda disponer de un segundo muelle destinado a descargas. Esta decisión no responde a la necesidad diaria promedio, sino a criterios de seguridad operativa, redundancia y flexibilidad. El muelle adicional permitirá absorber picos de demanda, garantizar la continuidad en caso de fallas o mantenimientos, y separar los flujos de carga y descarga, mejorando la eficiencia y reduciendo riesgos de congestión en la operación logística.

7.7. Anexo VII: “Selección del refrigerante para el almacén”

Para la selección del refrigerante del sistema de congelado se realizó un análisis comparativo entre tres alternativas comúnmente utilizadas en refrigeración industrial: amoníaco (NH₃), hidrofluorocarbonos (HFCs) y dióxido de carbono (CO₂).

Para ello se definieron cuatro factores principales.

- Seguridad operativa: contempla la clasificación toxicológica e inflamabilidad de cada refrigerante según ISO 817 y ASHRAE 34, su comportamiento ante fugas y los requisitos constructivos asociados (ventilación, zonas de exclusión y materiales compatibles).



Recibe la mayor ponderación porque la instalación convive con personal y debe minimizar riesgos.

- Impacto ambiental: evalúa el Potencial de Agotamiento del Ozono (ODP), el Potencial de Calentamiento Global (GWP) y el tratamiento normativo de cada refrigerante bajo regulaciones internacionales, especialmente la Enmienda de Kigali que restringe progresivamente sustancias de alto GWP.
- Eficiencia energética: considera el comportamiento termodinámico del refrigerante en aplicaciones de baja temperatura, su rendimiento en condiciones de congelado y su capacidad para sostener coeficientes de operación adecuados.
- Compatibilidad técnica y modularidad: analiza la facilidad de integración al sistema, la disponibilidad de equipos, la compatibilidad con materiales comunes (acero, cobre, inoxidable), y la posibilidad de implementar configuraciones compactas o modulares que faciliten el mantenimiento y la expansión futura.

Factor	Peso	NH ₃	HFC	CO ₂
Seguridad operativa	0,40	1 (0,4)	3 (1,2)	5 (2)
Impacto ambiental	0,30	5 (1,5)	1 (0,3)	5 (1,5)
Eficiencia energética	0,20	5 (1)	4 (0,8)	4 (0,8)
Compatibilidad técnica / modular	0,10	3 (0,3)	3 (0,3)	5 (0,5)
TOTAL	1	3,20	2,60	4,80

Tabla VII.1: Selección del refrigerante

Fuente: Elaboración propia, 2025

Los resultados muestran una diferencia clara entre las alternativas: el CO₂ obtiene el puntaje más alto (4,80), seguido por el amoníaco (3,20) y los HFC (2,60). Esta superioridad del CO₂ se explica a partir del análisis técnico posterior.

Desde el punto de vista ambiental, el amoníaco presenta un excelente desempeño con ODP = 0 y GWP = 0. En cambio, los HFCs tienen un impacto ambiental muy elevado: refrigerantes como el R-22 (ODP = 0,05; GWP ≈ 1.810) o el R-134a (ODP = 0; GWP ≈ 1.430) están sujetos a eliminación progresiva bajo la Enmienda de Kigali. El CO₂ (R-744) también tiene ODP = 0 y un GWP = 1, lo que lo convierte en una alternativa prácticamente neutra en términos climáticos. En relación con la seguridad y la compatibilidad de materiales, el amoníaco se clasifica como B2L, es decir, tóxico y ligeramente inflamable, y no puede emplearse con cobre ni con sus aleaciones, lo que incrementa los requisitos constructivos. El CO₂ se clasifica como A1 (no tóxico y no inflamable), condición que favorece su uso en zonas urbanas o semiresidenciales, y es compatible con materiales ampliamente utilizados como acero, inoxidable y cobre. Los HFCs también son A1, pero su impacto ambiental limita su aplicabilidad futura.

Desde el punto de vista del diseño, los sistemas de CO₂ transcrito permiten configuraciones compactas y modulares con racks plug and play que reducen la superficie de sala de máquinas y facilitan ampliaciones mediante módulos adicionales. Los sistemas con NH₃ también pueden ser modulares, pero requieren ventilación forzada, detectores de fuga y zonas de exclusión, lo que incrementa la complejidad. Los sistemas con HFCs son fáciles de instalar, pero su restricción normativa los vuelve poco sostenibles.

En materia regulatoria, el amoníaco está sujeto a requisitos estrictos como IRAM 3545 en Argentina, mientras que los HFCs enfrentan las restricciones de Kigali. El CO₂, por su parte, está regulado principalmente por las normas EN 378 e ISO 5149, que contemplan sus altas presiones operativas (hasta 130 bar en transcrito) pero no imponen limitaciones asociadas a toxicidad o inflamabilidad debido a su clasificación A1.

En términos termodinámicos, el NH₃ es muy eficiente por su alto calor latente, mientras que el CO₂ ofrece un buen rendimiento en baja temperatura y permite componentes compactos por su elevada densidad volumétrica. Los HFCs presentan eficiencias moderadas. En cuanto a costos, el amoníaco es económico en operación pero exige infraestructura de seguridad costosa, mientras que el CO₂ requiere equipos de alta presión pero reduce espacio y facilita la expansión modular. Los HFCs presentan costos crecientes por restricciones internacionales.

En conjunto, al considerar desempeño ambiental, seguridad, normativa, eficiencia, diseño y viabilidad futura, el CO₂ transcrito se presenta como la alternativa más equilibrada para el proyecto, justificando su selección como refrigerante del sistema de congelado

7.8. Anexo VIII: “Selección del WMS”

Para garantizar una elección fundamentada de la solución WMS adecuada para el almacén, se utilizará el método de ponderación simple. En la siguiente tabla se presentan los criterios considerados para la evaluación de las alternativas WMS, junto con la ponderación asignada a cada uno, reflejando su importancia relativa en la operación del almacén frigorífico automatizado.

Criterio	Descripción	Ponderación (%)
1. Integración con Pallet Shuttle	Capacidad de coordinar de forma nativa con carros <i>Shuttle</i> y equipos automatizados, asegurando correcta gestión de pallets.	30
2. Control de inventario y trazabilidad	Precisión en seguimiento de pallets, gestión de lotes y fechas de vencimiento, soporte FIFO/LIFO, visibilidad en tiempo real.	25



3.Eficiencia operativa	Optimización de ciclos de carga/descarga, planificación de tareas, reducción de tiempos muertos y mejora en uso de recursos.	20
4.Soporte y <i>partners</i> locales	Disponibilidad de implementación, asistencia técnica y mantenimiento en Argentina, soporte en idioma local	15
5. Escalabilidad y visualización	Capacidad de crecer con la operación y ofrecer visualización 3D o paneles intuitivos para supervisión y planificación	10

Tabla VIII.1: Criterios de selección del WMS y su ponderación

Fuente: Elaboración propia, 2025

A continuación, se encuentra la tabla de criterios de evaluación junto con sus ponderaciones y las puntuaciones asignadas a cada alternativa WMS, utilizada para calcular el puntaje ponderado.

Criterio	Ponderación (%)	SAP EWM	Infor WMS	Easy WMS
1	30	9	7	10
2	25	9	8	8
3	20	9	8	9
4	15	9	8	9
5	10	10	8	8
Total	100	9,1	7,7	8,95

Tabla VIII.2. Ponderación de WMS

Fuente: Elaboración propia, 2025

SAP EWM resultó con el mayor puntaje ponderado (9,1), destacándose como una solución adecuada para el almacén frigorífico automatizado de 500 m² con sistema Pallet *Shuttle*. Aunque Easy WMS presenta ventajas en algunos criterios específicos, la evaluación global indica que SAP EWM ofrece la mejor combinación de integración, eficiencia y soporte local.