

Diseño de un almacén inteligente para productos congelados con integración de tecnologías 4.0 y refrigeración por CO_2

Design of a smart warehouse for frozen products with integration of industry 4.0 technologies and CO_2 refrigeration

Cutropía, María Laura

mlauracutropia@gmail.com

Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata

Oostdijk, Milagros

milioostdijk@gmail.com

Esp. Ing. Berardi, María Betina (Director)

bberardi@fi.mdp.edu.ar

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata

RESUMEN

Este trabajo final desarrolla el diseño de un almacén inteligente para productos congelados en el Parque Industrial Aurel. Para la infraestructura, se compararon distintos sistemas de estanterías, resultando más conveniente el Pallet Shuttle Automatizado por su equilibrio entre densidad, seguridad y operatividad. Respecto a la refrigeración, se evaluaron alternativas con NH_3 (nitrógeno), HFCs (hidrofluorocarbonos) y CO_2 (dióxido de carbono), seleccionándose un sistema transcritical de CO_2 por su eficiencia, seguridad y mínimo impacto ambiental. Se optó por el modelo ECO_2 Large de Costan, con configuración modular de tres unidades en paralelo que asegura redundancia y escalabilidad. Además, se incorporó un sistema de gestión de almacenes (WMS) con trazabilidad en tiempo real, integración con ERP y compatibilidad con IoT, lo que permite optimizar ubicaciones y mejorar el control de inventarios. Finalmente, la implementación de tecnologías 4.0, sensores IoT, AGVs, picking robotizado y analítica avanzada, refuerza la eficiencia operativa y la toma de decisiones, posicionando al almacén como un nodo logístico inteligente, sustentable y altamente competitivo.

Palabras Claves: almacén automatizado; pallet shuttle; refrigeración CO_2 ; IoT.

ABSTRACT

This final project develops the design of an intelligent warehouse for frozen products in the Aurel Industrial Park. For the infrastructure, different racking systems were compared, with the Automated Pallet Shuttle being the most convenient due to its balance between density, safety, and operability. Regarding refrigeration, alternatives with NH_3 (ammonia), HFCs (hydrofluorocarbons), and CO_2 (carbon dioxide) were evaluated, selecting a transcritical CO_2 system for its efficiency, safety, and minimal environmental impact. The ECO_2 Large model from Costan was chosen, with a modular configuration of three parallel units that ensures redundancy and scalability. In addition, a Warehouse Management System (WMS) was incorporated, with real-time traceability, ERP integration, and IoT compatibility, which allows for optimized slotting and improved inventory control. Finally, the implementation of Industry 4.0 technologies, IoT sensors, AGVs, robotic picking, and advanced analytics reinforces operational efficiency and decision-making, positioning the warehouse as an intelligent, sustainable, and highly competitive logistics hub.

Keywords: automated warehouse; pallet shuttle; CO_2 refrigeration; IoT.

1. INTRODUCCIÓN

La logística de frío enfrenta una creciente presión global y local impulsada por el aumento sostenido en la demanda de productos congelados. A nivel mundial, el mercado de almacenamiento en frío alcanzó en 2023 un valor estimado de 138 mil millones de dólares y se proyecta que supere los 373 mil millones en 2031 (Kings Research, 2024), impulsado por el mayor consumo de alimentos perecederos, los avances tecnológicos y el crecimiento del comercio electrónico (Mecalux, 2024).

En Argentina, esta tendencia se refleja en la saturación de la infraestructura frigorífica: la capacidad actual resulta insuficiente para atender la demanda, generando cuellos de botella que afectan la eficiencia y competitividad del sector alimentario (Palazzo, 2024). En el partido de General Pueyrredón, pese a la presencia de empresas como Solimeno, Frío Polar y Grupolar SA, la oferta de infraestructura sigue siendo insuficiente.

En este contexto, el desarrollo de instalaciones frigoríficas inteligentes se plantea como una respuesta estratégica a las nuevas demandas del sector. La inauguración del Parque Industrial "Aurel Parq", ubicado sobre la Ruta 88 a pocos minutos de Mar del Plata, refuerza esta oportunidad al ofrecer condiciones óptimas para proyectos de este tipo, con una superficie total de 41 hectáreas, 107 lotes y una infraestructura de servicios adecuada para el establecimiento de industrias tecnológicas y logísticas.

El presente proyecto tiene como objetivo general diseñar un almacén de productos congelados que incorpore tecnologías logísticas de última generación, orientadas a optimizar el espacio, asegurar la conservación de la cadena de frío y mejorar la trazabilidad. Se propone la integración de sistemas de estanterías de alta densidad, equipos automatizados de manejo de materiales, refrigeración por CO₂ y gestión digital, transformando el almacén en un nodo logístico inteligente, sostenible y competitivo.

2. DESARROLLO

Diseño y análisis del almacén frigorífico

El almacén frigorífico se proyecta sobre un lote de 2.000 m² en el Parque Industrial Aurel, seleccionado por su ubicación estratégica y la infraestructura disponible. La normativa del parque establece un FOS (factor de ocupación del suelo) máximo de 0,5 y una altura límite de 15 m, lo que permite una superficie cubierta de 1.000 m² en planta baja. Esta capacidad constructiva posibilita destinar el espacio al almacenamiento y a áreas complementarias (oficinas, vestuarios y zonas técnicas), e incorporar estanterías de alta densidad junto con sistemas automatizados de manipulación de pallets.

La distribución de la superficie se define en función de los requerimientos operativos y la importancia relativa de cada sector dentro del flujo logístico. Así, el área de almacenamiento ocupa el 50 % del total, mientras que las zonas de carga y descarga, recepción y control, y expedición y salida en conjunto representan un 20 %. Las áreas destinadas a preparación de pedidos (7 %), oficinas y servicios (7 %), zonas técnicas (8 %) y módulos de refrigeración (8 %) completan la distribución general.

En cuanto a la altura, se adopta el máximo permitido por la normativa del Parque Industrial Aurel. Sin embargo, la altura útil efectiva destinada al almacenamiento se reduce a 12 m, dado que se reserva un espacio superior para instalaciones técnicas y márgenes de seguridad estructural.

Para el área de almacenamiento, se seleccionó el sistema pallet *Shuttle* Automatizado, debido a su capacidad de combinar alta densidad de almacenamiento, eficiencia operativa, trazabilidad precisa y compatibilidad con condiciones de congelado. Esta elección se fundamenta en un análisis comparativo

Diseño de un almacén inteligente para productos congelados con integración de tecnologías 4.0 y refrigeración por CO₂
Cutropía, L.; Oostdijk, M.

frente a otras tres tipologías de estanterías: *Drive-In*, *Push-Back* y *pallet Shuttle* manual. A partir de una matriz multicriterio ponderada, el *Shuttle* Automatizado obtuvo la mayor puntuación (4,8 sobre 5), destacándose en automatización, seguridad operativa, velocidad de operación y adaptabilidad a alta rotación, superando a *Drive-In* (2,75), *Push-Back* (3,3) y *pallet Shuttle* manual (4,5). Además, permite aprovechar al máximo el volumen del almacén mediante la disposición longitudinal de las estanterías.

Una vez seleccionado el sistema *pallet Shuttle* Automatizado, se procedió a su dimensionamiento técnico y configuración geométrica, considerando tanto las características del equipamiento como las restricciones operativas del almacén frigorífico. El sistema, de alta densidad y automatización, utiliza carros *Shuttle* motorizados para cargar y descargar pallets sin necesidad de que ingresen autoelevadores a los pasillos, mejorando seguridad, eficiencia y aprovechamiento volumétrico. Se adoptaron pallets tipo Arlog normalizados por IRAM 10016, de 1.000 × 1.200 mm y hasta 1.500 kg de carga, compatibles con los carriles y la orientación perpendicular requerida por el *Shuttle*. El módulo de almacenamiento se definió con ancho de 1.630,5 mm y profundidad de 1.000 mm, y la altura de cada unidad de carga (pallet + mercadería + carril) es de 2.000 mm, permitiendo configurar hasta cinco niveles útiles dentro de 12 m de altura útil.

La disposición longitudinal de las estanterías, adoptada tras un análisis comparativo con la orientación transversal (que permitía 1.120 posiciones), posibilita alcanzar 1.170 posiciones de pallets, optimizando la densidad de almacenamiento y el flujo operativo. El diseño prevé una separación perimetral mínima de 150 mm respecto de las paredes para facilitar inspecciones, evitar contactos estructurales y permitir la ventilación del aire frío. El dimensionamiento de los racks sigue las recomendaciones del fabricante y criterios de seguridad: se contemplan holguras laterales de 75 mm por lado según Mecalux, complementadas con un margen adicional de 100 mm para eventuales sobrepasos de la carga, y una tolerancia en profundidad de 25 mm por pallet. Entre niveles se mantiene una separación vertical de 150 mm para absorber tolerancias constructivas y favorecer la accesibilidad. Finalmente, se disponen dos pasillos de circulación de 1,7 m, uno longitudinal y otro transversal, para la operación de transelevadores y *transfer stations*, asegurando accesibilidad, modularidad y eficiencia en todo el sistema.

A continuación, se seleccionaron los equipos de manejo de materiales. El almacén frigorífico automatizado está concebido para operar con mínima intervención humana en un entorno de baja temperatura. En el área de almacenamiento se emplean transelevadores y carros *Shuttle* Automatizados que trasladan los pallets hasta su ubicación final, logrando un almacenamiento de alta densidad sin ingreso de operarios.

En la zona de carga y descarga, un sistema con horquillas automáticas deposita los pallets en transportadores motorizados, desde donde los vehículos de guiado automático (AGVs) con navegación SLAM los conducen hacia la *transfer station*, que organiza y distribuye los pallets entre las estanterías y las estaciones de *picking*. Estos vehículos optimizan recorridos en pasillos estrechos y aseguran precisión mediante sensores LiDAR 3D y visión artificial.

Durante el *picking*, los AGVs trasladan los pallets a estaciones robotizadas con inteligencia artificial que identifican productos, calculan trayectorias y determinan el agarre más adecuado, ajustando su desempeño mediante aprendizaje automático. Además, los AGVs asisten en tareas de inspección y mantenimiento, trasladando los carros *Shuttle* desde los canales hacia el área técnica y garantizando la continuidad del flujo operativo sin afectar la eficiencia general del sistema.

Luego, se diseñó el área de carga y descarga, concebida como un bloque funcional que integra las operaciones de recepción, control, expedición y despacho de mercaderías. Este sector, de 15,8 m de ancho por 5,3 m de profundidad, conecta directamente con la playa de maniobras, facilitando la aproximación y alineación de los camiones para las tareas de carga y descarga. La configuración del andén permite que los

semirremolques se posicionen externamente mientras la plataforma de carga permanece protegida dentro de la instalación, asegurando la continuidad de la cadena de frío y resguardando la mercadería frente a las condiciones climáticas.

Para dimensionar la zona se calculó la cantidad de muelles en función del volumen diario de pallets, la capacidad de los camiones y los tiempos operativos, resultando suficiente un muelle para cubrir la demanda promedio. No obstante, se incorporó un segundo muelle destinado a descargas para garantizar redundancia operativa, flexibilidad ante picos de actividad y separación de flujos, optimizando la eficiencia del sistema.

El diseño contempla criterios de seguridad y maniobrabilidad, con distancias óptimas entre muelles de 4.600 mm, respecto de las paredes laterales de 3.000 mm (mínimas 2.400 mm), y una explanada exterior de 35,5 m. Los muelles automatizados permiten la transferencia de pallets mediante sistemas con horquillas operados por AGVs, que conectan las zonas de carga y descarga con el sistema *Shuttle* o las estaciones de *picking*. Además, se incluyen elementos de control y protección como topes, guías, semáforos y señalización, garantizando operaciones de acople y transferencia precisas y seguras (Inkema Sistemas, 2023).

Sistema de refrigeración

En la evaluación de sistemas de refrigeración industrial se compararon NH₃ (3,2), HFCs (2,6) y CO₂ (4,8) (subcrítico y transcrito). Desde el punto de vista ambiental, el NH₃ y el CO₂ destacan por su bajo impacto: el primero posee GWP (Potencial de Calentamiento Global) y ODP (Potencial de Agotamiento de Ozono) iguales a 0, mientras que el segundo es neutro en cambio climático, no tóxico y no inflamable, lo que lo hace seguro para entornos urbanos y de alta ocupación. En contraste, los HFCs como el R-134a presentan un GWP elevado (≈ 1.430) y, aunque no dañan la capa de ozono, contribuyen al efecto invernadero y están regulados por la Enmienda de Kigali.

En términos de seguridad y compatibilidad, el CO₂ presenta ventajas operativas porque puede emplearse con cobre, acero al carbono y acero inoxidable, lo que permite el uso de componentes compactos y modulares y facilita su integración en espacios reducidos. En contraste, el NH₃ es corrosivo para el cobre y exige materiales específicos, ventilación forzada, detectores de fugas y personal especializado, lo que aumenta la complejidad y los costos del sistema.

Desde el punto de vista normativo, ambos refrigerantes están sujetos a regulaciones estrictas; sin embargo, el CO₂, clasificado como A1 (no tóxico y no inflamable), permite una implementación más flexible que el NH₃, que debe cumplir con normas como ASHRAE 15, con zonas de exclusión y protocolos de seguridad exigentes. Los HFCs, además de su alto impacto ambiental, están siendo eliminados progresivamente de las aplicaciones industriales, reduciendo su viabilidad a largo plazo (Swegon, 2023).

La decisión de optar por un sistema de CO₂ transcrito se fundamenta en la combinación de eficiencia energética, seguridad operativa, compatibilidad de materiales, facilidad de instalación y cumplimiento normativo. Su capacidad de operar en condiciones tanto subcríticas como supercríticas permite optimizar el rendimiento en un rango amplio de temperaturas ambientales, ofreciendo flexibilidad para aplicaciones industriales y comerciales. Asimismo, su modularidad y diseño compacto permiten instalar varios módulos en paralelo, adaptando la capacidad a las necesidades del almacén, reduciendo el espacio requerido para la sala de máquinas y facilitando tareas de mantenimiento sin interrumpir la operación del sistema.

En el diseño propuesto se adopta una configuración de baja temperatura con módulos compactos y tecnología *Plug & Play*, que combinan eficiencia energética y flexibilidad operativa, asegurando un

funcionamiento confiable y continuo. La potencia frigorífica requerida para un almacén de 500 m² y 12 m de altura útil se estima entre 270 y 360 kW, considerando el nivel de aislamiento térmico, la rotación de productos y los picos de demanda.

El sistema está conformado por una central frigorífica ubicada en la sala de máquinas (compresores, válvulas de expansión electrónicas, eyectores, subenfriadores, panel de control y componentes auxiliares) conectada a evaporadores colgantes, válvulas, sensores y cañerías aisladas dentro del almacén. Se mantiene un despeje mínimo de 1 m sobre la carga y 50 cm lateral para facilitar mantenimiento y operación.

Se efectuó un análisis multicriterio de proveedores locales e internacionales (Danfoss, Epta Latam/Costan, Intarcon y Carel), considerando soporte técnico, flexibilidad, cumplimiento normativo, experiencia, innovación y facilidad de instalación. La alternativa seleccionada fue Costan ECO₂Large, de fabricación local, con tecnología FTE (*Full Transcritical Efficiency*) y diseño modular que permite instalar tres unidades en paralelo, dos operativas y una de *backup*, garantizando disponibilidad, eficiencia energética y continuidad operativa.

Esta configuración optimiza la capacidad frigorífica, facilita el mantenimiento sin interrupciones y asegura el funcionamiento dentro de los rangos de temperatura y potencia requeridos.

Propuesta de sistema de gestión digital del almacén (WMS)

Para el almacén frigorífico automatizado de 500 m² con Pallet *Shuttle*, se evaluaron tres soluciones líderes de WMS: SAP EWM (Extended Warehouse Management), Infor WMS y Easy WMS (Mecalux).

- SAP EWM destaca por su integración nativa con SAP ERP, control de inventario en tiempo real, gestión de recursos, visualización 3D y compatibilidad con AS/RS, *Shuttles*, robots y sensores IoT. En Argentina se implementa a través de partners certificados como Netlogistik y Stratesys.
- Infor WMS ofrece funciones similares con planificación de olas, secuenciación inteligente, trazabilidad por lotes y facturación 3PL, disponible localmente mediante Grupo Novatech.
- Easy WMS se integra directamente con Pallet *Shuttle*, gestionando ciclos de carga/descarga y ubicaciones FIFO/LIFO desde una interfaz única; permite control de lotes y fechas de vencimiento.

La solución seleccionada fue SAP EWM por su mayor nivel tecnológico, integración completa con ERP y escalabilidad. Se implementará de manera centralizada, suficiente para un único centro logístico. El modelado operativo incluye *layout* de zonas, *buffer* y canales *Shuttle*, así como el rastreo de cada pallet cómo *Handling Unit* (HU) en tiempo real.

Para la interacción con los AGVs se implementará un *Warehouse Control System* (WCS), encargado de traducir las órdenes generadas por SAP EWM en instrucciones operativas, coordinando de manera integrada las distintas tecnologías automatizadas como transelevadores, *Shuttles* y robots (Figura 1).



Figura 1: Interacción entre SAP ERP, SAP EWM y el WCS

Fuente: Elaboración propia, 2025

Diseño de un almacén inteligente para productos congelados con integración de tecnologías 4.0 y refrigeración por CO₂
Cutropía, L.; Oostdijk, M.

En el almacén frigorífico se implementará una red de sensores IoT en las áreas de recepción, almacenamiento, *picking* y despacho, para monitorear en tiempo real temperatura, humedad, ocupación, desempeño del sistema de refrigeración y aperturas de puertas, garantizando la integridad de la cadena de frío. Los datos se integrarán en SAP EWM, conectado al ERP corporativo, asegurando decisiones logísticas coherentes con la planificación general.

Asimismo, se incorporará una plataforma de analítica avanzada que combina enfoques descriptivos, diagnósticos, predictivos y prescriptivos para analizar datos históricos, anticipar incidencias y proponer acciones correctivas, optimizando la eficiencia operativa, energética y la trazabilidad conforme a normativas como HACCP y Codex Alimentarius. El sistema operará dentro del ecosistema SAP, mediante herramientas como SAP Analytics Cloud y SAP Predictive Analytics.

A través de SAP EWM, el almacén automatizado podrá monitorear indicadores clave de desempeño (KPIs) vinculados a eficiencia, precisión, uso de recursos y capacidad de respuesta ante variaciones de demanda, definidos bajo criterios SMART (específicos, medibles, alcanzables, relevantes y temporales).

Tabla 1 - Indicadores de desempeño

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 por debajo del 5%
Tiempo promedio de descarga	Tiempo desde la llegada del transporte hasta que el producto está en área de inspección medido semanalmente	$\sum(\text{Tiempo descarga}) / \text{N}^{\circ} \text{ de descargas}$	≤ 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	$\text{Superficie pasillos} / \text{Superficie total}$	$< 15\%$

KPI	Descripción	Fórmula	Objetivo
<i>PICKING</i>			
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	$\Sigma(\text{Tiempo } \textit{picking}) / \text{N}^{\circ} \text{ de pedidos}$	≤ 20 minutos promedio
<i>DESPACHO</i>			
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

Fuente: Elaboración propia, 2025

La evaluación de un almacén frigorífico automatizado implica analizar cómo las decisiones adoptadas en cada etapa del diseño inciden en los KPIs, considerando especialmente los ejes estratégicos de capacidad, eficiencia energética, costos operativos y trazabilidad. En este sentido, se presenta a continuación una matriz de correlación entre decisiones de diseño y KPIs que permite visualizar y sintetizar el impacto de cada variable sobre el rendimiento global del sistema.

Tabla 2 - Evaluación comparativa de decisiones de diseño frente a KPIs

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

Diseño de un almacén inteligente para productos congelados con integración de tecnologías 4.0 y refrigeración por CO₂
Cutropía, L.; Oostdijk, M.

Decisión de diseño	Capacidad	Eficiencia energética	Costos	Trazabilidad
Sistema de refrigeración (CO ₂ transcrito ECO ₂ Large)	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

Fuente: Elaboración propia, 2025

Cada decisión de diseño del almacén frigorífico impacta de forma distinta en la capacidad, la eficiencia energética, los costos y la trazabilidad. El sistema *Pallet Shuttle* maximiza la capacidad y reduce costos, aunque requiere gestión digital para asegurar trazabilidad. La refrigeración con CO₂ ofrece alta eficiencia y bajo impacto ambiental, pero implica mayor inversión. Un WMS integrado al ERP optimiza operaciones y minimiza errores, mientras que las tecnologías 4.0 posibilitan gestión predictiva y trazabilidad integral con una inversión elevada. En conjunto, estos factores muestran que la selección de alternativas debe evaluarse integralmente para equilibrar los cuatro ejes estratégicos y garantizar un desempeño competitivo y sostenible (Figura 2).

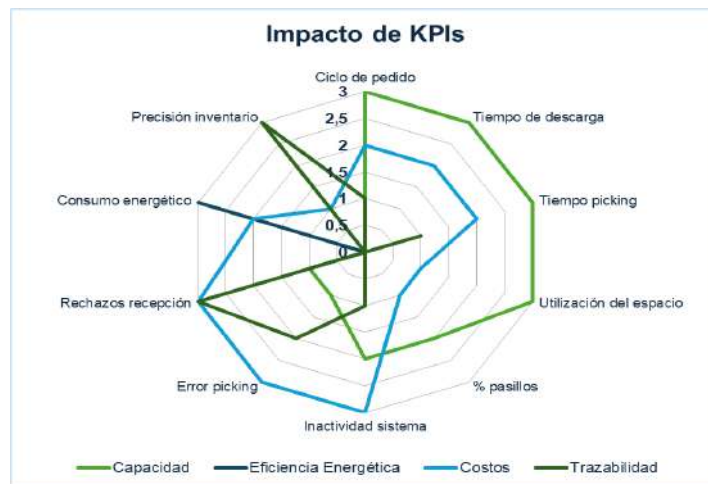


Figura 2: Radar de impacto de KPIs en dimensiones estratégicas
Fuente: Elaboración propia, 2025

Evaluación del impacto de tecnologías 4.0 en la toma de decisiones

La Logística 4.0 redefine la cadena de suministro mediante IoT, inteligencia artificial, robótica, *Big Data* y automatización, incrementando visibilidad, trazabilidad y eficiencia operativa (Velasco Torres & Pomárico Ortiz, 2022). En los almacenes frigoríficos, este modelo de “almacenamiento inteligente” transforma datos dispersos en información útil en tiempo real, mejorando la toma de decisiones y la capacidad de respuesta (Altertecnica, 2021).

Diseño de un almacén inteligente para productos congelados con integración de tecnologías 4.0 y refrigeración por CO₂ *Cutropía, L.; Oostdijk, M.*

Los sensores IoT integrados al WMS controlan temperatura, humedad, ubicación y stock, detectando desviaciones antes de afectar la calidad. La inteligencia artificial y el aprendizaje automático optimizan inventarios y anticipan la demanda, mientras que la robótica y los AGVs ejecutan tareas con precisión, reduciendo errores y tiempos operativos (Vinssa, 2025).

La analítica de datos identifica patrones y oportunidades de mejora (SCM, 2024). Los enfoques descriptivo, diagnóstico, predictivo y prescriptivo permiten anticipar y corregir desviaciones, optimizando inventarios y rutas de *picking* (Veconinter, 2021).

La interoperabilidad entre WMS y ERP mejora la coordinación entre proveedores, operadores y clientes, acelera la respuesta ante imprevistos y alinea las decisiones logísticas con los objetivos estratégicos y de sostenibilidad (Salcedo, 2024). En entornos industriales gestionados con SAP WMS, esta integración impulsa la automatización (SGV Software, 2023) y el análisis predictivo, incrementando el rendimiento global (Ramírez, 2023). Además, contribuye a una gestión más sostenible de los recursos y a la reducción de desperdicios (Evaluando ERP, 2023).

En conjunto, la convergencia de tecnologías como la inteligencia artificial, el IoT y la robótica genera cadenas de suministro inteligentes, resilientes y autoajustables en tiempo real, mejorando la eficiencia energética, la trazabilidad y la capacidad de anticiparse a disrupciones del mercado global (*World Economic Forum*, 2025).

3. CONCLUSIONES

El diseño del almacén frigorífico integra soluciones logísticas y tecnológicas de última generación para optimizar el espacio, garantizar la cadena de frío y asegurar la trazabilidad operativa. El sistema *Pallet Shuttle* Automatizado eleva la capacidad a 1.170 pallets en 500 m², mejorando la eficiencia y reduciendo costos, mientras que transelevadores y AGVs minimizan la intervención humana y optimizan los tiempos de operación.

El sistema de refrigeración transcrito por CO₂ (ECO₂Large) combina alta eficiencia energética, bajo impacto ambiental y continuidad operativa, equilibrando sostenibilidad y rentabilidad pese a mayores costos de inversión y mantenimiento. La integración de un WMS con tecnologías 4.0 e IoT refuerza la trazabilidad, el control de inventarios y la toma de decisiones en tiempo real, optimizando la gestión en entornos de baja temperatura.

La incorporación de tecnologías 4.0 como IoT, *Big Data*, inteligencia artificial y robótica reduce errores, optimiza las rutas de *picking*, mejora la eficiencia energética y refuerza la trazabilidad, impactando de forma integral en los principales indicadores de desempeño. En conjunto, el proyecto demuestra que es posible integrar eficiencia operativa, sostenibilidad y flexibilidad tecnológica, consolidando una base sólida para la competitividad del almacenamiento frigorífico. Como líneas futuras, se plantean el análisis económico de la inversión inicial, la evaluación del desempeño del CO₂ en climas cálidos y la ciberseguridad en la integración de tecnologías 4.0.

4. REFERENCIAS

- Altertecnica. (2021). *Refrigeración 4.0: la inteligencia artificial aplicada a la industria del frío*. Disponible en: <https://altertecnica.com/refrigeracion-4-0-industria-del-frio/>
- 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/>

Diseño de un almacén inteligente para productos congelados con integración de tecnologías 4.0 y refrigeración por CO₂
Cutropía, L.; Oostdijk, M.

- 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
- Kings Research (2024). *Mercado de alimentos congelados*. Disponible en: <https://www.kingsresearch.com/es/frozen-foods-market-640>
- Mecalux (2020). *Los depósitos frigoríficos: diseño y automatización*. Disponible en: <https://www.mecalux.com.ar/blog/depositos-frigorificos>
- Mecalux. (2021). *Pallet Shuttle automático*. Disponible en: <https://www.mecalux.com.ar/soluciones-para-almacenamiento/almacen-automatico-para-pallets/pallet-shuttle-automatico>
- Mecalux México. (2024). *Mecalux lanza al mercado un sistema robotizado para picking con la tecnología IA de Siemens* [Video]. YouTube. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=H3Ow9PFFi8k>
- 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/>
- 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/articles/sistemas-erp-es/optimizing-warehouse-ops-with-sap-wms-3948261/>
- 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/>
- 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/>
- 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>
- 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 agro cadenas, caso de estudio del café en Colombia*. [Monografía de compilación, Universidad Piloto de Colombia Seccional del Alto Magdalena]. Disponible en: <https://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/11950/Tecnologia%20blockchain%20agro cadenas%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/>
- 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/>