

UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Industrias Universidad Técnica Federico Santa María
Candidato Ingeniería Civil Industrial

Modelamiento y optimización de sistemas de Logistikautomatisierung para consolidación operacional en HYDAC International GmbH

Matías Sánchez Adam

ID 202060079-1

Supervisor

Benedikt Kastel

Hydac Accessories GmbH

Internal Supervisor

Prof. Rolando Rubilar

INDUSTRIAS - U.T.F.S.M.

Co-supervisor

Oliver Froehlich

Mercedes-Benz AG - Mentor

Academic Year 2025/2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Modelamiento y optimización de sistemas de Logistikautomatisierung para consolidación operacional en HYDAC International GmbH

Nombre del candidato(a): Matías Nicolás Sánchez Adam

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Industrial

Campus: Casa Central Valparaíso **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rolando Rubilar, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por **(marcar una opción)**:

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 27/10/2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 27/10/2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

LaTeX document compiled on July 13, 2026.

Acknowledgements and Additional Information
This thesis was developed during an international internship at
HYDAC International GmbH – Werk 12 in Germany.
The author gratefully acknowledges the financial and academic support
provided by the German Academic Exchange Service (DAAD Stipendiat)
and the financial support received through the Mercedes-Benz AG.

Professional profile and additional information:
de.linkedin.com/in/mercedesbenz-de

A mis papás
y abuelitos...

Contents

Abstract **xi**
Resumen . . . xiii

1 Introducción **1**
1.1 Contexto general . . . 1
1.2 Contexto de la empresa . . . 2
1.3 Planteamiento del problema . . . 3
1.4 Pregunta de investigación . . . 5
1.5 Objetivo general . . . 5
1.6 Objetivos específicos . . . 6
1.7 Alcances y limitaciones . . . 6
1.8 Estructura de la memoria . . . 7

2 Marco Organizacional **9**
2.1 HYDAC International GmbH . . . 9
2.2 Contexto industrial del proyecto . . . 10
2.3 Werk 12 como unidad de análisis . . . 11
2.4 Áreas logísticas relevantes . . . 12
2.4.a Werk 12b . . . 13
2.4.b Área 9600 en Werk 12 . . . 13
2.4.c Almacén auxiliar F009 . . . 14
2.5 Operaciones CX . . . 15
2.6 Operaciones FSA/FSK . . . 15
2.7 Nordstern 2026 como marco estratégico . . . 16
2.8 Actores involucrados y dinámica de trabajo . . . 17
2.9 Importancia del proyecto para HYDAC Werk 12 . . . 18
2.10 Síntesis del marco organizacional . . . 18

3 Marco Teórico **21**
3.1 Intralogística . . . 21
3.2 Automatización del almacenamiento . . . 22
3.2.a Criterios para evaluar tecnologías de almacenamiento . . . 23
3.3 Vertical Lift Modules . . . 23
3.3.a Capacidad y utilización en sistemas VLM . . . 24
3.3.b VLM como solución para consolidación . . . 25
3.4 SAP y SAP EWM . . . 25
3.4.a Importancia de los movimientos SAP en la toma de decisiones . . . 26
3.4.b Integración entre VLM y SAP EWM . . . 26
3.5 Modelamiento de capacidad . . . 27

3.5.a Capacidad física versus capacidad operacional . . . 28
3.6 Optimización discreta . . . 28
3.6.a Programación entera mixta . . . 29
3.6.b Rendimientos decrecientes . . . 29
3.7 Evaluación técnico-económica . . . 30
3.7.a CAPEX y OPEX . . . 31
3.8 Indicadores financieros . . . 31
3.8.a Valor Actual Neto . . . 32
3.8.b Tasa Interna de Retorno . . . 32
3.8.c Retorno sobre la inversión . . . 32
3.8.d Período de recuperación . . . 33
3.9 Análisis de escenarios . . . 33
3.10 Automatización del transporte interno mediante AMR . . . 33
3.10.a Planificación de rutas AMR . . . 34
3.11 Relación entre teoría y caso aplicado . . . 35

4 Metodología **37**
4.1 Diseño metodológico . . . 37
4.2 Enfoque de investigación aplicada . . . 38
4.3 Etapas generales de la metodología . . . 39
4.4 Inducción y comprensión del contexto estratégico . . . 39
4.5 Levantamiento de información en terreno . . . 40
4.6 Construcción y análisis del layout . . . 40
4.7 Fuentes de información . . . 42
4.7.a Fuentes primarias . . . 42
4.7.b Datos SAP . . . 42
4.7.c Documentación técnica de proveedores . . . 42
4.7.d Parámetros económicos internos . . . 42
4.8 Análisis operacional del sistema actual . . . 43
4.9 Análisis de datos SAP . . . 43
4.10 Benchmark de alternativas tecnológicas . . . 44
4.11 Modelamiento de capacidad . . . 45
4.12 Evaluación técnico económica . . . 46
4.13 Modelo de optimización discreta . . . 46
4.14 Evaluación complementaria de AMR . . . 47
4.15 Validación de resultados . . . 48
4.16 Síntesis metodológica . . . 49

5 Diagnóstico del Sistema Actual **51**
5.1 Descripción general del sistema . . . 51
5.2 Werk 12 . . . 52
5.3 Werk 12b . . . 54
5.4 F009 . . . 55
5.5 Flujo de materiales . . . 56
5.6 Análisis de procesos . . . 57
5.7 Problemas identificados . . . 58
5.7.a Dispersión del inventario . . . 58

5.7.b Capacidad limitada para CX en Werk 12 . . . 59
5.7.c Dependencia de F009 . . . 59
5.7.d Alto volumen de movimientos 261 . . . 59
5.7.e Relocalizaciones internas . . . 59
5.7.f Distancias de desplazamiento y tiempos no productivos . . . 59
5.7.g Riesgos ergonómicos . . . 59
5.7.h Limitada integración digital . . . 60
5.8 Oportunidades de mejora . . . 60
5.8.a Consolidación de CX y FSA/FSK . . . 60
5.8.b Reducción de dependencia de F009 . . . 61
5.8.c Automatización mediante VLM . . . 61
5.8.d Clasificación de materiales según rotación . . . 61
5.8.e Reducción de movimientos 315 . . . 61
5.8.f Integración con SAP EWM . . . 61
5.8.g Automatización complementaria del transporte interno . . . 62
5.9 Digitalización del registro de inventario no rotulado: HyScan . . . 62
5.10 Síntesis del diagnóstico . . . 62

6 Análisis de Datos SAP **65**
6.1 Datos utilizados . . . 65
6.2 Extracción y tratamiento de datos . . . 67
6.3 Movimientos SAP . . . 68
6.3.a Movimiento 101 . . . 68
6.3.b Movimiento 261 . . . 69
6.3.c Movimiento 315 . . . 71
6.4 Análisis agregado de abril 2025 . . . 73
6.5 Clasificación de materiales . . . 74
6.6 Análisis por grupo de materiales . . . 75
6.6.a CX . . . 75
6.6.b FSA/FSK . . . 76
6.7 Resultados obtenidos . . . 77
6.8 Implicancias para el modelamiento de capacidad . . . 78
6.9 Implicancias para la evaluación económica . . . 78
6.10 Síntesis del análisis SAP . . . 79

7 Modelamiento de Capacidad **81**
7.1 Introducción al modelamiento de capacidad . . . 81
7.2 Objetivo del modelo de capacidad . . . 82
7.3 Supuestos del modelo . . . 82
7.4 Definición de unidades de almacenamiento . . . 83
7.5 Capacidad validada del Modula ML50D . . . 85
7.6 Análisis de capacidad actual . . . 86
7.6.a Footprint CX . . . 86
7.6.b Footprint FSA/FSK . . . 86
7.6.c Footprint combinado . . . 87
7.7 Proyección de crecimiento . . . 87
7.8 Escenarios evaluados . . . 88
7.9 Escenarios con tolerancia operacional . . . 90

7.10 Capacidad física versus capacidad operacional . . . 91
7.11 Fast movers y distribución operacional . . . 92
7.12 Evaluación cualitativa de escenarios . . . 93
7.12.a Escenario 1: un lift . . . 93
7.12.b Escenario 2: dos lifts . . . 93
7.12.c Escenario 3: tres lifts . . . 93
7.12.d Escenario 4: cuatro lifts . . . 94
7.12.e Escenario 5: cinco lifts . . . 94
7.13 Resultados del modelamiento . . . 94
7.14 Relación con Nordstern 2026 . . . 96
7.15 Síntesis del capítulo . . . 96

8 Evaluación de Alternativas **99**
8.1 Introducción a la evaluación de alternativas . . . 99
8.2 Requerimientos de diseño . . . 100
8.3 Identificación de alternativas . . . 101
8.3.a Racks tradicionales . . . 101
8.3.b Nuevo almacén o expansión física . . . 102
8.3.c Vertical Lift Modules . . . 102
8.3.d Shuttle systems . . . 103
8.3.e AS/RS . . . 103
8.3.f AMR como complemento de transporte interno . . . 103
8.4 Benchmark tecnológico . . . 104
8.5 Proveedores VLM considerados . . . 105
8.6 Comparación técnica de proveedores de almacenamiento vertical . . . 106
8.6.a Modula . . . 106
8.6.b Kardex . . . 108
8.6.c Hänel . . . 110
8.6.d SSI Schäfer . . . 112
8.6.e Síntesis comparativa de los proveedores . . . 114
8.7 Evaluación técnica . . . 115
8.8 Evaluación operacional . . . 116
8.9 Evaluación económica preliminar . . . 117
8.10 Evaluación estratégica . . . 118
8.11 Matriz de decisión . . . 119
8.12 Selección de alternativa . . . 119
8.13 Relación con el modelo de capacidad . . . 120
8.14 Síntesis del capítulo . . . 121

9 Evaluación Técnico-Económica **123**
9.1 Introducción a la evaluación técnico-económica . . . 123
9.2 Supuestos económicos . . . 124
9.3 CAPEX . . . 125
9.4 OPEX . . . 126
9.5 Ahorros esperados . . . 126
9.5.a Ahorro de personal . . . 127
9.5.b Ahorro en inventario . . . 127
9.5.c Ahorro por reducción de superficie . . . 128

9.5.d Ahorro por relocalizaciones internas . . . 128
9.5.e Ahorro por reducción de posiciones de almacenamiento . . . 128
9.5.f Ahorro anual total . . . 129
9.6 Rendimientos decrecientes . . . 130
9.7 Estructura de flujo de caja . . . 131
9.8 Evaluación financiera . . . 132
9.8.a Valor Actual Neto . . . 132
9.8.b Tasa Interna de Retorno . . . 132
9.8.c Retorno sobre la inversión . . . 133
9.8.d Payback . . . 133
9.9 Resultados financieros por escenario . . . 133
9.10 Análisis del escenario recomendado . . . 135
9.11 Comparación entre escenarios . . . 136
9.12 Análisis de sensibilidad . . . 137
9.12.a Sensibilidad al ahorro anual . . . 137
9.12.b Sensibilidad a la tasa de descuento . . . 138
9.12.c Sensibilidad al CAPEX . . . 138
9.13 Interpretación estratégica de los resultados . . . 138
9.14 Síntesis del capítulo . . . 139

10 Modelo de Optimización **141**
10.1 Introducción . . . 141
10.2 Planteamiento del problema . . . 142
10.3 Variables de decisión . . . 143
10.4 Parámetros del modelo . . . 143
10.5 Función de ahorros con rendimientos decrecientes . . . 144
10.6 Restricciones del modelo . . . 146
10.6.a Restricción de número máximo de módulos . . . 146
10.6.b Restricción de capacidad operacional . . . 146
10.6.c Restricción secuencial . . . 146
10.6.d Naturaleza binaria . . . 147
10.7 Función objetivo . . . 147
10.8 Formulación MIP completa . . . 147
10.9 Criterio marginal de decisión . . . 148
10.10 Resultados del modelo . . . 149
10.11 Análisis de dominancia . . . 151
10.12 Interpretación operacional . . . 151
10.13 Interpretación económica . . . 152
10.14 Interpretación estratégica . . . 153
10.15 Modelo extendido propuesto para asignación futura de materiales . . . 154
10.16 Sensibilidad del modelo . . . 155
10.16.a Sensibilidad al ahorro marginal . . . 155
10.16.b Sensibilidad al requerimiento operacional . . . 155
10.16.c Sensibilidad al CAPEX . . . 155
10.16.d Sensibilidad a la tasa de descuento . . . 155
10.17 Discusión del resultado óptimo . . . 156
10.18 Configuración recomendada . . . 156

10.19Síntesis del capítulo 157

11 Discusión **159**

11.1 Introducción 159
11.2 Interpretación general de los resultados 160
11.3 Interpretación del diagnóstico As Is 161
11.4 Impacto operacional 161
11.4.a Consolidación de materiales 161
11.4.b Reducción de relocalizaciones internas 162
11.4.c Mejora del picking hacia producción 162
11.4.d Ergonomía y condiciones de trabajo 163
11.5 Impacto económico 163
11.6 Rendimientos decrecientes y decisión marginal 165
11.7 Impacto estratégico 165
11.8 Impacto organizacional 166
11.9 Comparación con la literatura y fundamentos teóricos 167
11.10Limitaciones del análisis 168
11.11Riesgos de implementación 168
11.12Trabajo futuro 170
11.12.a Asignación optimizada de materiales a los módulos 170
11.12.b Integración detallada con SAP EWM 170
11.12.c Simulación operacional 170
11.12.d Evaluación post implementación 170
11.12.e Automatización del transporte interno mediante AMR 171
11.13Discusión integrada 171
11.14Síntesis del capítulo 172

12 Conclusiones **173**

12.1 Conclusiones generales 173
12.2 Respuesta a la pregunta de investigación 174
12.3 Cumplimiento del objetivo general 175
12.4 Cumplimiento de objetivos específicos 175
12.4.a Objetivo específico 1 175
12.4.b Objetivo específico 2 175
12.4.c Objetivo específico 3 176
12.4.d Objetivo específico 4 176
12.4.e Objetivo específico 5 176
12.4.f Objetivo específico 6 176
12.5 Principales hallazgos 177
12.6 Recomendaciones 178
12.7 Limitaciones 178
12.8 Líneas futuras de investigación 179
12.9 Cierre final 180

Bibliography **181**

Acknowledgments **185**

Abstract

This thesis develops a methodology for diagnosing, modelling, evaluating and optimizing an intralogistics investment decision at HYDAC International GmbH, specifically within the context of Werk 12 in Germany. The project is framed by the Nordstern 2026 strategy, which aims to support operational consolidation, logistics digitalization and future integration with SAP EWM. The initial problem was related to storage capacity constraints, material dispersion across Werk 12b, area 9600 and F009, a high volume of movements toward production, and the need to define an automated storage solution capable of supporting the future growth of CX and FSA/FSK operations.

To address this challenge, the current storage system was diagnosed through field observation, interviews, layout analysis and SAP data review. SAP movements 101, 261 and 315 were analyzed to characterize goods receipt, consumption toward production and internal relocations. Based on this information, a capacity model was developed considering the current footprint of CX and FSA/FSK, projected growth under Nordstern 2026, nominal and usable capacity of Modula ML50D Vertical Lift Modules, and operational robustness criteria. In addition, several storage technology alternatives were evaluated, including traditional racks, physical expansion, VLM, shuttle systems, AS/RS and suppliers such as Modula, Kardex, Hänel and SSI Schäfer.

The technical economic evaluation considered investment cost, maintenance, operational savings, NPV, IRR, ROI and payback for scenarios ranging from one to five modules. Finally, a discrete optimization model was formulated, incorporating diminishing returns and operational capacity constraints. The results indicate that the recommended configuration consists of three Modula ML50D units, as this alternative maximizes Net Present Value among the feasible scenarios, enables the consolidation of CX and FSA/FSK materials, reduces dependency on F009, provides sufficient usable capacity and aligns with the Nordstern 2026 vision.

The thesis concludes that warehouse automation should not be understood only as a technology purchasing decision, but rather as a strategic intralogistics redesign decision based on data, capacity, economic evaluation, operational requirements and future growth.

Keywords: intralogistics, warehouse automation, Vertical Lift Module, SAP EWM, discrete optimization, technical economic evaluation, HYDAC, Nordstern 2026.

Resumen

La presente memoria desarrolla una metodología de diagnóstico, modelamiento, evaluación y optimización para apoyar la toma de decisiones intralogísticas en HYDAC International GmbH, específicamente en el contexto de Werk 12 en Alemania. El proyecto se enmarca en la estrategia Nordstern 2026, orientada a la consolidación operacional, digitalización logística e integración futura con SAP EWM. La problemática inicial se relacionaba con restricciones de capacidad, dispersión de materiales entre Werk 12b, área 9600 y F009, alta carga de movimientos hacia producción y necesidad de definir una solución de almacenamiento automatizado capaz de sostener el crecimiento de las operaciones CX y FSA/FSK.

Para abordar este desafío, se realizó un diagnóstico del sistema actual mediante levantamiento de información en terreno, entrevistas, análisis de layout y revisión de datos SAP. Posteriormente, se analizaron movimientos 101, 261 y 315 para caracterizar recepción, consumo hacia producción y relocalizaciones internas. A partir de esta información se desarrolló un modelo de capacidad considerando el footprint actual de CX y FSA/FSK, crecimiento proyectado bajo Nordstern 2026, capacidad nominal y usable de módulos verticales Modula ML50D, y criterios de robustez operacional. Además, se evaluaron alternativas tecnológicas de almacenamiento, incluyendo racks tradicionales, expansión física, VLM, shuttle systems, AS/RS y proveedores como Modula, Kardex, Hänel y SSI Schäfer.

La evaluación técnico económica consideró inversión, mantenimiento, ahorros operacionales, VAN, TIR, ROI y payback para escenarios de uno a cinco módulos. Finalmente, se formuló un modelo de optimización discreta incorporando rendimientos decrecientes y restricciones de capacidad operacional. Los resultados indican que la configuración recomendada corresponde a tres módulos Modula ML50D, ya que maximiza el Valor Actual Neto entre las alternativas factibles, permite consolidar materiales CX y FSA/FSK, reduce la dependencia de F009, entrega capacidad usable suficiente y se alinea con la visión Nordstern 2026.

La memoria concluye que la automatización del almacenamiento no debe entenderse únicamente como una decisión de compra tecnológica, sino como una decisión estratégica de rediseño intralogístico basada en datos, capacidad, economía, operación y crecimiento futuro.

Palabras clave: intralogística, automatización de almacenamiento, Vertical Lift Module, SAP EWM, optimización discreta, evaluación técnico económica, HYDAC, Nordstern 2026.

1 Introducción

1.1 Contexto general

Durante los últimos años, la automatización logística ha dejado de ser solamente una alternativa tecnológica para grandes centros de distribución, y se ha transformado en una necesidad concreta para empresas industriales que deben operar con mayor variedad de productos, mayor presión por disponibilidad de materiales, menores tiempos de respuesta y restricciones físicas cada vez más relevantes dentro de sus plantas. En este contexto, la intralogística, entendida como la gestión de los flujos internos de materiales dentro de una organización productiva, adquiere un rol central, ya que no basta con producir más o vender más si el sistema de almacenamiento, abastecimiento y movimiento interno no es capaz de sostener ese crecimiento de forma ordenada, trazable y económicamente eficiente.

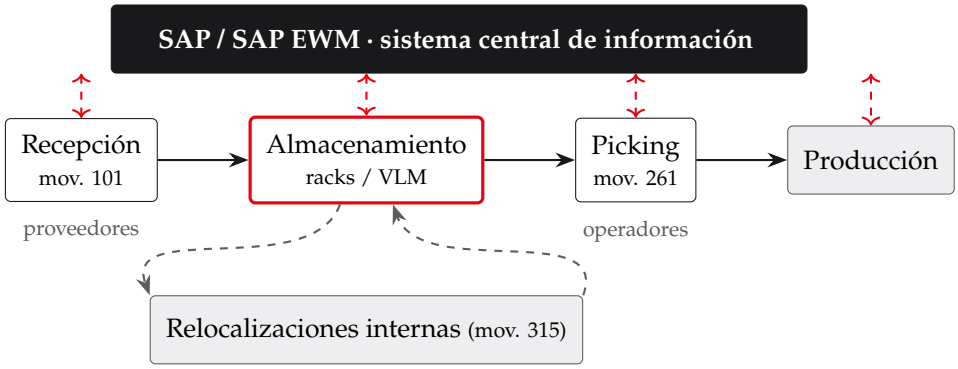


Figure 1.1: Esquema conceptual de la automatización intralogística: flujo físico de materiales integrado con SAP como sistema central de información.

En industrias manufactureras, especialmente aquellas con alta variedad de componentes técnicos, el almacén no puede observarse únicamente como un lugar físico donde se guardan materiales, sino como un sistema de decisión que conecta planificación, compras, producción, logística, costos y servicio al cliente. Cada ubicación de almacenamiento, cada traslado interno, cada recepción de material y cada picking hacia producción genera tiempo, costo y riesgo operacional. Por esta razón, cuando una planta comienza a crecer, los problemas de capacidad no aparecen solamente como falta de espacio, sino también como mayores recorridos, más relocalizaciones internas, más búsquedas de material, menor transparencia de stock, mayor dependencia de procesos manuales y más dificultad para integrar la operación con sistemas digitales como SAP EWM.

En este escenario, tecnologías como los Vertical Lift Modules, también conocidos como VLM, se han convertido en una solución relevante para aumentar densidad de almacenamiento, reducir superficie ocupada, mejorar ergonomía y disminuir tiempos de búsqueda y desplazamiento. Sin embargo, la decisión de incorporar este tipo de tecnología no puede basarse únicamente en que la solución sea moderna o atractiva desde el punto de vista técnico. En una planta industrial real, la decisión debe responder a restricciones de capacidad, costos de inversión, beneficios esperados, compatibilidad con sistemas existentes, flujos de materiales, crecimiento futuro y retorno económico. Por ello, la automatización del almacenamiento debe entenderse como una decisión de inversión intralogística bajo restricciones operacionales, económicas y estratégicas.

1.2 Contexto de la empresa

La presente memoria se desarrolla a partir de la práctica realizada en HYDAC International GmbH, específicamente en el contexto de Werk 12, en Alemania. HYDAC es una empresa industrial alemana con presencia internacional, orientada al desarrollo y fabricación de soluciones hidráulicas, sistemas de filtración, componentes de control, acumuladores, sensores y distintas soluciones técnicas para aplicaciones industriales. Dentro de esta estructura, Werk 12 cumple un rol relevante en el abastecimiento de componentes para líneas de montaje y producción, particularmente para grupos de materiales asociados a CX y al portafolio FSA/FSK.



Figure 1.2: HYDAC International GmbH, Werk 12 (Alemania). Fuente: HYDAC.

El proyecto se enmarca dentro de una iniciativa estratégica interna denominada Nordstern 2026, donde Nordstern significa “estrella norte”. Esta visión define una dirección de transformación para Werk 12, orientada a consolidar operaciones, aumentar capacidad de almacenamiento, reducir procesos manuales, avanzar hacia una logística sin papel e integrar las operaciones del almacén con SAP EWM. En términos simples, Nordstern 2026 funciona como el marco estratégico que presiona al sistema logístico actual a evolucionar desde una estructura fragmentada y parcialmente manual hacia un concepto más compacto, automatizado, digital y escalable.

Dentro de este marco, uno de los desafíos principales consistía en consolidar mate-

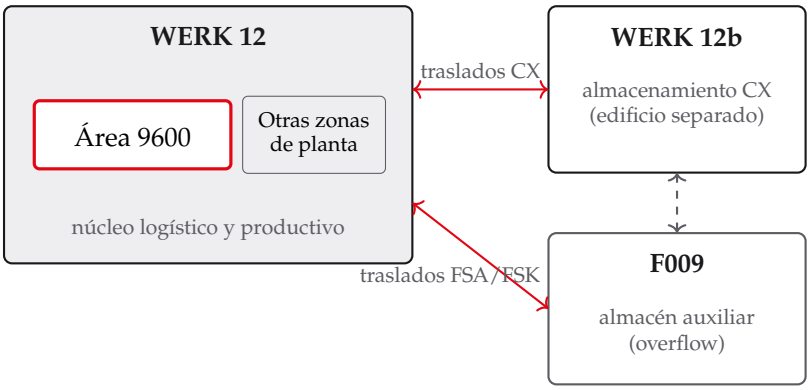


Figure 1.3: Relación entre Werk 12, Werk 12b y el almacén auxiliar F009: la operación se encuentra dividida en tres zonas físicas que intercambian materiales de forma permanente.

riales actualmente distribuidos entre distintas zonas, principalmente Werk 12b, el área 9600 dentro de Werk 12 y el almacén auxiliar F009. La situación inicial no correspondía a un problema completamente resuelto por la empresa, sino más bien a una necesidad estratégica abierta, existía presión por aumentar capacidad, reducir dependencia de F009, consolidar CX bajo un concepto más eficiente y preparar la operación para el crecimiento futuro, pero todavía no existía una solución única, cerrada ni cuantitativamente justificada. Esta condición fue especialmente relevante, porque obligó a desarrollar primero un diagnóstico robusto antes de evaluar cualquier alternativa tecnológica.

1.3 Planteamiento del problema

Al inicio del proyecto, HYDAC contaba con información preliminar sobre sus restricciones logísticas, pero no disponía de una visión completamente consolidada del sistema de almacenamiento involucrado. Existían datos parciales, referencias internas, conocimiento operativo de supervisores y operadores, y lineamientos estratégicos asociados a Nordstern 2026, sin embargo, parte importante de la información necesaria para tomar una decisión de inversión debía levantarse, estructurarse y validarse durante el desarrollo del trabajo. Esto incluyó visitas a terreno, entrevistas con operadores y supervisores, análisis de información SAP, revisión de ubicaciones físicas, construcción de planos y comprensión progresiva de los flujos reales de material.

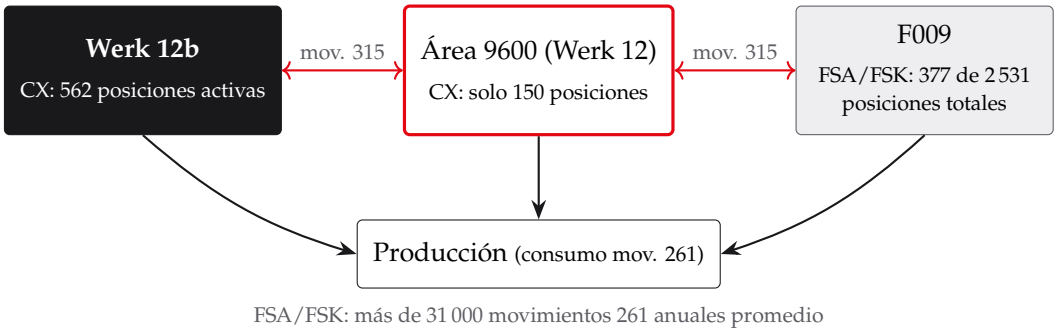


Figure 1.4: Situación As Is al inicio del proyecto: inventario CX y FSA/FSK disperso entre Werk 12b, área 9600 y F009, con relocalizaciones internas permanentes y alta carga de consumo hacia producción.



Figure 1.5: Zona representativa de almacenamiento manual en racks en la situación actual. Fuente: HYDAC, registro propio en terreno.

La situación actual presentaba varios elementos críticos. En primer lugar, CX utilizaba 562 posiciones activas en Werk 12b, mientras que dentro del área 9600 en Werk 12 solo existían 150 posiciones disponibles para este grupo de materiales. Esta diferencia evidenciaba una brecha importante entre la operación actual y el objetivo estratégico de consolidar CX dentro de Werk 12. En segundo lugar, el almacén F009 contaba con 2.531 posiciones de almacenamiento, de las cuales solo 377 estaban asignadas a FSA/FSK, lo que indicaba una alta dispersión del inventario y una baja consolidación de ubicaciones para materiales relevantes dentro del flujo productivo. Esta dispersión no solo consumía espacio, sino que además generaba relocalizaciones internas, recorridos adicionales y mayor complejidad de gestión.

Además, el análisis de movimientos SAP permitió observar que las operaciones CX y FSA/FSK generaban una carga logística significativa, especialmente a través de movimientos 261, asociados al consumo hacia producción, y movimientos 315, asociados a relocalizaciones internas. En el caso de FSA/FSK, el movimiento 261 representaba un volumen especialmente alto, superando los 31.000 movimientos anuales promedio en el período analizado. Esto muestra que el problema no era solamente almacenar más materiales, sino diseñar una configuración capaz de sostener altos niveles de picking, reducir recorridos, disminuir relocalizaciones y preparar el sistema para una operación más digital e integrada.

Desde el punto de vista de ingeniería industrial, el desafío consistía en transformar una necesidad estratégica y operacional en una decisión cuantitativa. No bastaba con afirmar que la empresa necesitaba más capacidad, ni tampoco con recomendar una solución automatizada por intuición. Era necesario responder preguntas concretas, tales como cuánta capacidad se requería realmente, qué materiales debían consolidarse, qué alternativas tecnológicas existían, cuál era el costo de la inversión, qué beneficios económicos podían

esperarse, cuántos módulos verticales eran necesarios, cuándo aparecían rendimientos decrecientes y cuál configuración lograba el mejor equilibrio entre capacidad, eficiencia, costo y alineación estratégica.

En consecuencia, el problema central de esta memoria puede entenderse como una decisión de inversión intralogística bajo incertidumbre y restricciones operacionales. La empresa necesitaba avanzar hacia un sistema más moderno, pero la configuración óptima no era evidente desde el inicio. Por una parte, instalar pocos módulos podía generar buenos indicadores financieros, pero no necesariamente resolver la capacidad, la redundancia o la eliminación de F009. Por otra parte, instalar demasiados módulos podía entregar holgura operacional, pero con menor retorno marginal y riesgo de sobredimensionamiento. La dificultad estaba precisamente en encontrar el punto donde la solución dejara de ser solo financieramente atractiva y pasara a ser también operacionalmente viable y estratégicamente coherente.

1.4 Pregunta de investigación

A partir del contexto anterior, la pregunta de investigación que orienta esta memoria es la siguiente:

> *¿Cómo diseñar una estrategia de automatización del almacenamiento que permita maximizar la capacidad y eficiencia operacional de las operaciones CX y FSA/FSK en HYDAC Werk 12 bajo las restricciones definidas por Nordstern 2026?*

Esta pregunta busca capturar el desafío principal del proyecto, el cual no se limita a seleccionar una tecnología específica, sino a construir una estrategia de automatización que responda a una necesidad industrial real, considerando datos operacionales, capacidad futura, restricciones físicas, integración con SAP EWM, evaluación económica y criterios de optimización. La pregunta también permite diferenciar la solución técnica, en este caso los módulos verticales Modula ML50D, del problema de fondo, que corresponde a la toma de decisiones para modernizar un sistema de almacenamiento industrial bajo condiciones de crecimiento y restricción.

1.5 Objetivo general

El objetivo general de esta memoria es:

> *Diagnosticar y modelar el sistema de almacenamiento actual mediante análisis operacional y análisis de datos SAP, integrando herramientas de optimización discreta y evaluación técnico económica para apoyar la toma de decisiones intralogísticas.*

Este objetivo se enfoca en el trabajo desarrollado para responder la pregunta de investigación, y no solamente en la solución final. Por ello, considera el diagnóstico de la situación actual, el modelamiento de capacidad, el uso de datos SAP como base objetiva de análisis, la evaluación económica de alternativas y la formulación de un modelo de optimización discreta que permita comparar configuraciones posibles de automatización.

1.6 Objetivos específicos

Para cumplir el objetivo general, se definen los siguientes objetivos específicos:

1. Caracterizar el sistema de almacenamiento actual mediante el análisis de procesos, flujos de materiales y datos operacionales asociados a las operaciones CX y FSA/FSK.
2. Analizar los patrones de movimiento e inventario a partir de información extraída desde SAP para identificar requerimientos operacionales y restricciones del sistema.
3. Modelar la capacidad de almacenamiento requerida bajo distintos escenarios de crecimiento y consolidación operacional.
4. Evaluar alternativas de almacenamiento automatizado mediante criterios operacionales, técnicos y económicos.
5. Determinar configuraciones de almacenamiento que maximicen el desempeño operacional y la viabilidad económica mediante herramientas de optimización discreta.
6. Proponer lineamientos para la toma de decisiones intralogísticas orientadas a la modernización del sistema de almacenamiento.

Estos objetivos específicos siguen la lógica real del proyecto, comenzando por la comprensión del sistema actual, continuando con el análisis de datos y capacidad, avanzando hacia la evaluación de alternativas tecnológicas y finalizando con la optimización y recomendación de una configuración de inversión. Esta secuencia permite que la memoria no se construya únicamente como una descripción de una solución, sino como un proceso completo de diagnóstico, modelamiento y decisión.

1.7 Alcances y limitaciones

El alcance de esta memoria incluye el análisis del sistema de almacenamiento vinculado a las operaciones CX y FSA/FSK en el entorno de HYDAC Werk 12, considerando las zonas Werk 12b, el área 9600 y el almacén auxiliar F009. Se consideran datos operacionales provenientes de SAP, observaciones de terreno, entrevistas con personal de logística, información técnica de proveedores, modelos de capacidad, escenarios de inversión, evaluación técnico-económica y formulación de un modelo de optimización discreta para determinar una configuración recomendada de automatización.

Dentro del análisis técnico se considera la evaluación de sistemas de almacenamiento automatizado, con énfasis en módulos verticales de elevación, especialmente el sistema Modula ML50D, además de una revisión comparativa de alternativas como Kardex, Hänel, SSI Schäfer, racks tradicionales, nuevos almacenes, shuttle systems y sistemas AS/RS. Asimismo, se incorpora el análisis posterior de automatización del transporte interno mediante AMR, particularmente como complemento del concepto de almacenamiento automatizado y no como el foco principal de la decisión de inversión inicial.

El alcance económico considera el cálculo de ahorros anuales asociados a reducción de tiempos de manipulación, disminución de esfuerzo en inventarios, liberación de superficie, reducción de relocalizaciones internas y eliminación de posiciones redundantes. También considera indicadores financieros como VAN, TIR, ROI y período de recuperación, bajo un horizonte de evaluación de cinco años y una tasa de descuento definida para

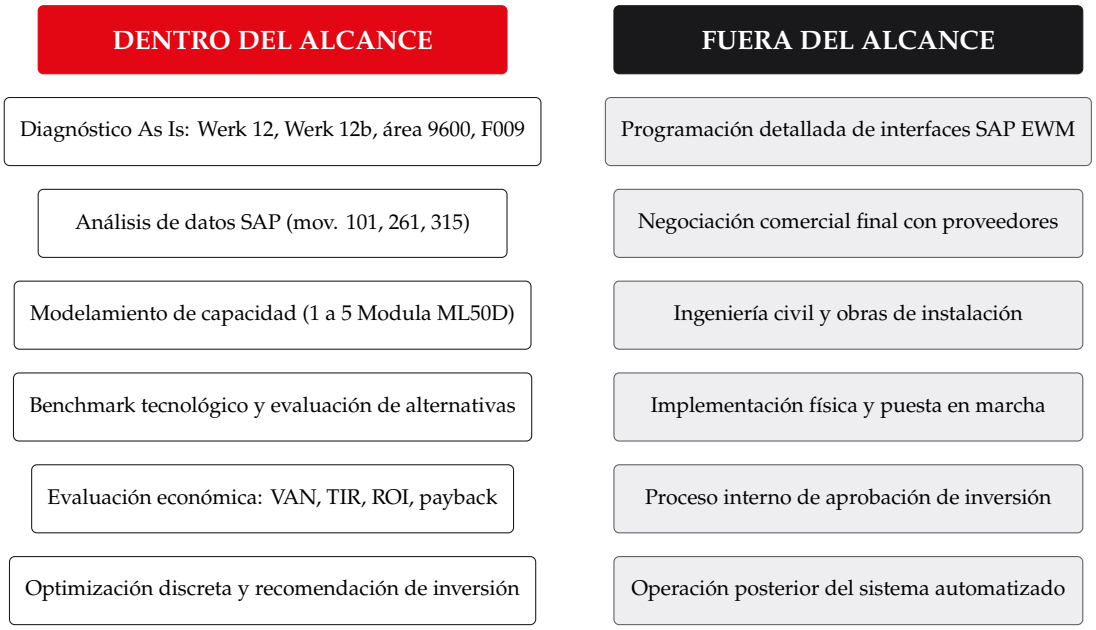


Figure 1.6: Alcance del proyecto: el trabajo se concentra en diagnóstico, modelamiento, evaluación y recomendación, dejando fuera la ejecución material de la solución.

el análisis. Estos indicadores permiten comparar escenarios de uno a cinco módulos verticales y evaluar la conveniencia económica de cada configuración.

La memoria no contempla la programación detallada de interfaces SAP EWM, la negociación comercial final con proveedores, la ingeniería civil de construcción, la implementación física de los equipos ni la puesta en marcha completa del sistema automatizado. Tampoco busca reemplazar los procesos internos de aprobación de inversión de HYDAC, sino entregar una base analítica para apoyar la toma de decisiones. En este sentido, el trabajo se concentra en la evaluación, modelamiento y recomendación, más que en la ejecución material del proyecto.

Una limitación relevante es que parte de los datos utilizados corresponde a información interna de HYDAC, por lo que ciertos detalles específicos de layouts, costos, ubicaciones o procesos pueden requerir anonimización, simplificación o presentación agregada en la versión final de la memoria. Asimismo, algunos supuestos de crecimiento, utilización y rendimiento futuro dependen de lineamientos estratégicos y estimaciones disponibles durante el período de práctica, por lo que los resultados deben interpretarse dentro del marco temporal y operativo en que fueron construidos.

1.8 Estructura de la memoria

La memoria se organiza en doce capítulos. El presente capítulo introduce el contexto general, el problema de investigación, los objetivos, los alcances y las limitaciones del estudio. El Capítulo 2 presenta el marco organizacional de HYDAC, describiendo la empresa, Werk 12, las operaciones CX y FSA/FSK, y el rol de Nordstern 2026 como marco estratégico del proyecto. El Capítulo 3 desarrolla el marco teórico necesario para comprender la automatización intralogística, los sistemas VLM, SAP EWM, el modelamiento de capacidad, la optimización discreta y la evaluación técnico-económica.

El Capítulo 4 describe la metodología utilizada, incluyendo el levantamiento de información, las visitas a terreno, el análisis operacional, el uso de datos SAP, el modelamiento de capacidad, la evaluación económica y la optimización discreta. El Capítulo 5 presenta el diagnóstico del sistema actual, explicando la situación As Is de Werk 12, Werk 12b y F009, junto con los principales problemas operacionales identificados. El Capítulo 6 profundiza en el análisis de datos SAP, considerando movimientos 101, 261 y 315, y su relevancia para comprender la carga de picking, consumo hacia producción y relocalizaciones internas.

El Capítulo 7 desarrolla el modelo de capacidad utilizado para comparar la demanda actual y futura con la capacidad ofrecida por distintas configuraciones de módulos Modula ML50D. El Capítulo 8 presenta la evaluación de alternativas de automatización, incluyendo la comparación de proveedores y tecnologías. El Capítulo 9 contiene la evaluación técnico-económica, con el cálculo de CAPEX, OPEX, ahorros, VAN, TIR, ROI y payback. El Capítulo 10 formula y analiza el modelo de optimización discreta, incorporando restricciones de capacidad y rendimientos decrecientes para determinar el número óptimo de módulos.

Finalmente, el Capítulo 11 discute los resultados obtenidos, su impacto operacional, económico y estratégico, junto con sus limitaciones y proyecciones futuras. El Capítulo 12 presenta las conclusiones generales, responde la pregunta de investigación, revisa el cumplimiento de los objetivos y entrega recomendaciones para la continuidad del proceso de modernización intralogística en HYDAC Werk 12.

2 Marco Organizacional

2.1 HYDAC International GmbH

HYDAC International GmbH es una empresa alemana de carácter industrial, con presencia internacional y un fuerte posicionamiento en el desarrollo de soluciones técnicas para sistemas hidráulicos, filtración, acumulación, control, sensores y componentes asociados a aplicaciones industriales. Dentro de este contexto, HYDAC opera como una organización altamente especializada, donde la confiabilidad de sus productos, la precisión técnica y la continuidad operacional de sus plantas productivas son elementos fundamentales para sostener su propuesta de valor. La empresa se caracteriza por trabajar con una alta variedad de referencias, componentes y familias de productos, lo que genera una exigencia logística considerable, ya que cada material debe estar disponible en el momento correcto, en la ubicación adecuada y bajo condiciones que permitan abastecer producción sin interrupciones.

Figure 2.1: Logotipo institucional de HYDAC International GmbH. Fuente: HYDAC.

El proyecto desarrollado se sitúa en Alemania, en el entorno de HYDAC Werk 12, donde Werk significa 'planta" o 'fábrica". Esta precisión es importante porque el término Werk no se refiere solamente a un edificio aislado, sino a una unidad productiva y logística dentro de la estructura industrial de HYDAC. En este caso, Werk 12 funciona como un espacio donde se integran actividades de almacenamiento, abastecimiento, producción y soporte logístico para distintas familias de materiales. Por lo mismo, cualquier modificación en su sistema de almacenamiento no representa únicamente un cambio de layout, sino una intervención directa sobre la forma en que la planta se organiza, abastece y prepara para crecer.

Durante la práctica, el trabajo se desarrolló en colaboración con el equipo de HYDAC, bajo la supervisión de Benedikt Kastel, y en conjunto con el equipo de proyecto compuesto por Vy Nguyen, Xu Deng y Matías Sánchez. Desde las primeras semanas, el proyecto tuvo un carácter aplicado y cercano a la operación real, ya que no se trató de trabajar sobre un caso hipotético, sino sobre una necesidad concreta de la empresa. Esto implicó conocer físicamente la planta, entender los procesos desde terreno, solicitar acceso a información



Figure 2.2: Instalaciones de HYDAC en Alemania. Fuente: HYDAC.

SAP, conversar con operadores y supervisores, y construir progresivamente una visión completa del sistema de almacenamiento.

2.2 Contexto industrial del proyecto

El contexto industrial en el cual se desarrolla esta memoria está marcado por una tensión muy común en empresas manufactureras de alto crecimiento: por un lado, existe una necesidad de aumentar capacidad y flexibilidad, y por otro lado, la infraestructura logística existente tiene límites físicos, operacionales y digitales. En HYDAC Werk 12, esta tensión se manifestó principalmente a través de la necesidad de consolidar materiales que se encontraban distribuidos entre distintas zonas, aumentar la densidad de almacenamiento, reducir la dependencia de almacenes auxiliares y preparar la operación para un esquema más digitalizado e integrado con SAP EWM.

En términos prácticos, el problema no consistía únicamente en "guardar más cajas". El desafío real era entender cómo debía organizarse el sistema completo para que el crecimiento de CX y FSA/FSK pudiera sostenerse sin aumentar innecesariamente los recorridos, las relocalizaciones internas, el trabajo manual y la complejidad de gestión. Este punto es clave, porque muchas veces una solución de almacenamiento puede parecer suficiente desde el punto de vista físico, pero no ser viable desde el punto de vista operacional. Por ejemplo, un sistema puede tener capacidad nominal para almacenar una cierta cantidad de materiales, pero si no permite separar fast movers, si genera congestión en picking, si no entrega redundancia o si no se integra correctamente con los flujos productivos, entonces la solución no resuelve realmente el problema industrial.

Desde esta perspectiva, la memoria se desarrolla en el cruce entre logística industrial, automatización de almacenamiento, evaluación de inversión y optimización operacional. La empresa necesitaba una recomendación que no fuera solo técnicamente posible, sino también económicamente justificable y estratégicamente alineada con su visión de futuro. Por ello, el proyecto se abordó como un proceso de análisis y toma de decisiones, donde

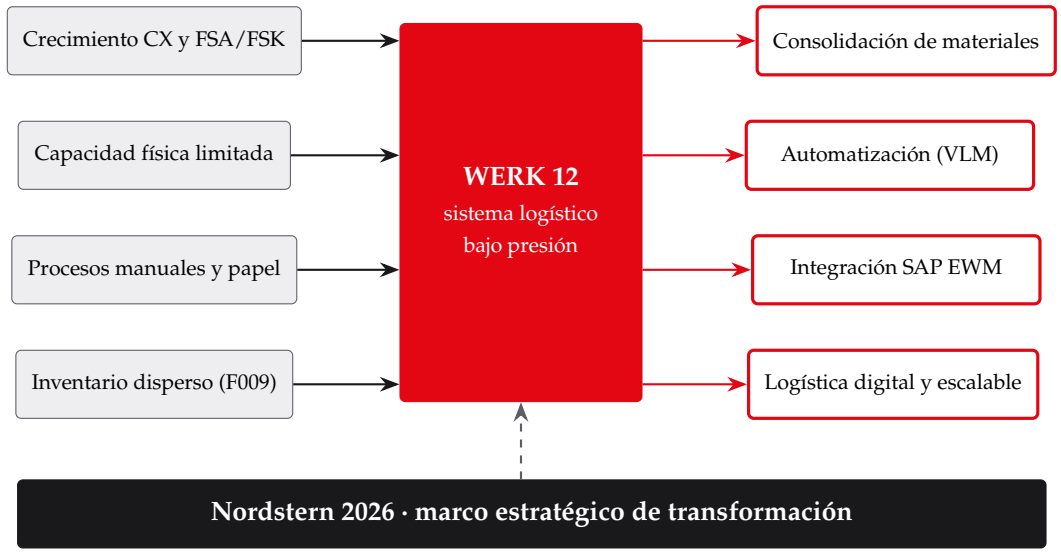


Figure 2.3: Contexto industrial del proyecto: presiones operacionales sobre Werk 12 y respuestas definidas bajo el marco estratégico Nordstern 2026.

cada etapa debía aportar evidencia: primero entender la situación actual, luego cuantificar la operación, después evaluar alternativas tecnológicas, más tarde modelar capacidades y finalmente justificar la configuración recomendada mediante indicadores financieros y un modelo de optimización.

2.3 Werk 12 como unidad de análisis

Werk 12 constituye el foco principal de esta memoria, ya que es el espacio donde HYDAC busca consolidar parte relevante de sus operaciones logísticas futuras.

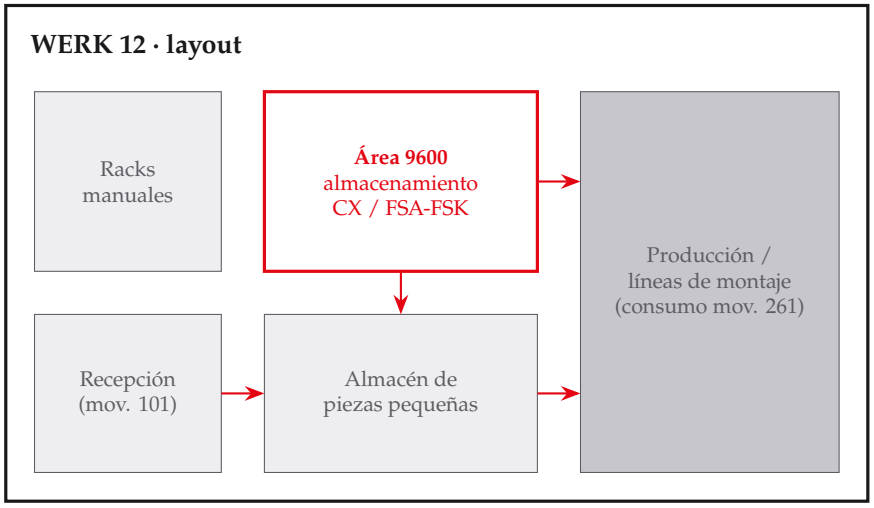


Figure 2.4: Layout general conceptual de Werk 12 con sus zonas logísticas principales y el flujo hacia producción.

En el proyecto, Werk 12 no fue tratado solamente como una ubicación física, sino como un sistema compuesto por zonas de almacenamiento, flujos de entrada y salida, procesos SAP, movimientos internos, estaciones de trabajo, restricciones de layout y requerimientos

de crecimiento. Esta mirada sistémica fue necesaria porque la decisión sobre automatización no podía evaluarse de forma aislada, sino considerando cómo afectaría al conjunto de la operación. En la situación inicial, Werk 12 ya contaba con una estructura de almacenamiento compuesta por posiciones manuales, posiciones automáticas y almacenamiento de pequeñas piezas. Sin embargo, esta capacidad no era suficiente para resolver completamente los requerimientos de consolidación de CX y FSA/FSK. Además, parte de los materiales relevantes se encontraba fuera del flujo principal, principalmente en Werk 12b y F009, lo que generaba dependencia de zonas auxiliares y aumentaba la complejidad logística. Por esta razón, el análisis de Werk 12 debía considerar no solo la capacidad existente, sino también su relación con otras áreas y el impacto que tendría una futura migración de materiales hacia un sistema automatizado.

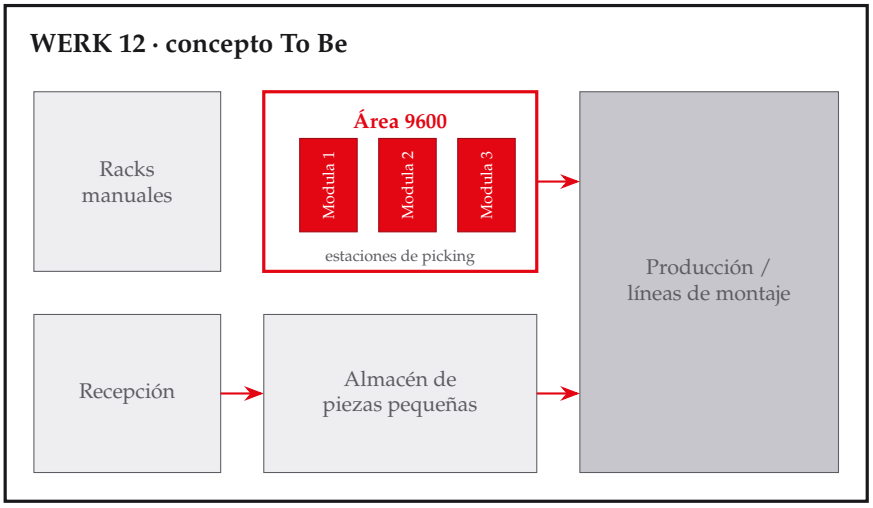


Figure 2.5: Ubicación conceptual de los tres módulos Modula ML50D dentro del área 9600 de Werk 12, junto a las estaciones de picking y con salida directa hacia producción.

Uno de los aspectos más importantes observados durante el desarrollo del proyecto fue que la planta no podía analizarse únicamente desde los datos de sistema. Los datos SAP entregaban una base cuantitativa esencial, pero era necesario complementarlos con visitas a terreno, conversaciones con operadores y revisión física de las ubicaciones. Esto permitió entender mejor cómo se comportaba realmente el sistema, dónde aparecían congestiones, qué rutas seguían los materiales, qué zonas funcionaban como apoyo y cuáles eran los puntos donde se generaban mayores esfuerzos manuales. Esta combinación entre datos y observación directa fue fundamental para que el diagnóstico no quedara desconectado de la realidad operacional.

2.4 Áreas logísticas relevantes

El proyecto considera principalmente tres áreas logísticas: Werk 12b, el área 9600 dentro de Werk 12 y el almacén auxiliar F009. Cada una de estas áreas cumple un rol distinto dentro de la situación actual, y entender su función fue un paso clave para construir la propuesta de automatización.

2.4.a Werk 12b

Werk 12b corresponde a un edificio utilizado principalmente para almacenamiento asociado a CX. En la situación inicial, CX contaba con 562 posiciones activas en esta zona, lo que evidenciaba que una parte importante de la operación se encontraba fuera del núcleo principal de Werk 12. Esta condición generaba una separación física relevante, porque los materiales almacenados en Werk 12b debían interactuar con procesos y consumos asociados al resto de la planta, aumentando la necesidad de movimientos internos y coordinación logística.

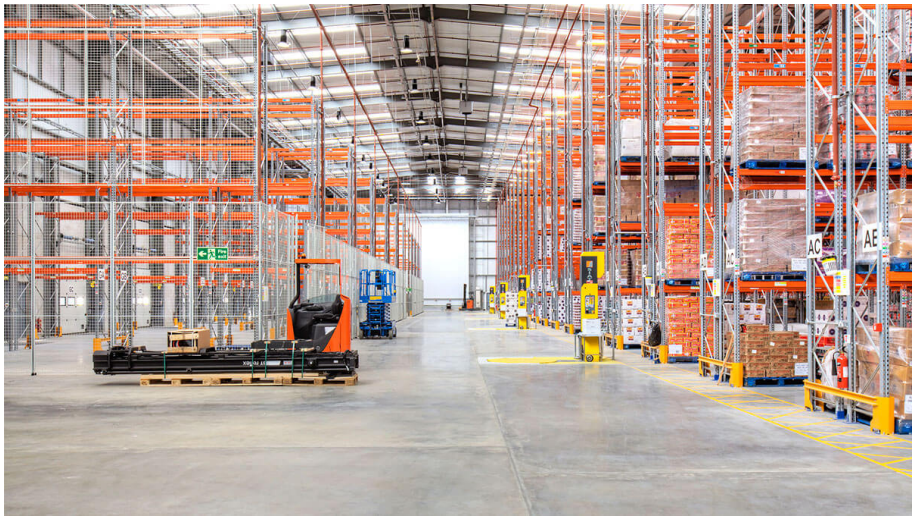


Figure 2.6: Werk 12b como zona actual de almacenamiento CX. Fuente: www.hydac.com/de-de/

Desde el punto de vista organizacional, Werk 12b representaba una solución funcional para la operación existente, pero no necesariamente compatible con la visión futura de Nordstern 2026. Mantener CX separado en Werk 12b implicaba sostener una estructura menos compacta, con menor integración digital y mayor dificultad para construir un flujo logístico centralizado. Por ello, uno de los objetivos estratégicos del proyecto fue estudiar la posibilidad de migrar o consolidar estos materiales dentro de Werk 12 mediante una solución de mayor densidad y mejor alineación con SAP EWM.

2.4.b Área 9600 en Werk 12

El área 9600 corresponde a una zona relevante dentro de Werk 12, utilizada en el análisis como punto de referencia para entender la capacidad disponible y los movimientos SAP asociados a CX y FSA/FSK. En la situación inicial, solo 150 posiciones estaban disponibles para CX dentro de esta área, una cifra muy inferior respecto del objetivo de crecimiento y consolidación planteado para el futuro. Este dato fue especialmente importante, porque mostró que la capacidad actual dentro del área objetivo no era suficiente para absorber el crecimiento esperado ni para consolidar completamente los materiales dispersos.

Desde el punto de vista operacional, el área 9600 concentra movimientos importantes, especialmente asociados a consumo hacia producción. Por ello, cualquier solución futura debía considerar no solo cuántas posiciones podían instalarse, sino también cómo se comportarían los flujos 101, 261 y 315 dentro de esta zona. En otras palabras, la ubicación 9600 no podía verse únicamente como un espacio disponible, sino como una zona crítica

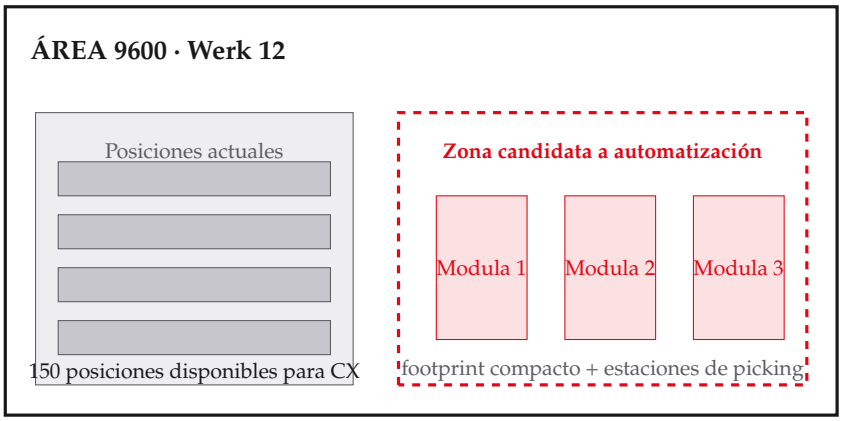


Figure 2.7: Plano conceptual del área 9600: posiciones actuales disponibles para CX y zona candidata para la instalación de los módulos verticales.

dentro del flujo de materiales.

2.4.c Almacén auxiliar F009

F009 corresponde a un almacén auxiliar que funciona como zona de apoyo y overflow para distintos grupos de materiales. En el análisis inicial se identificó que F009 contaba con 2.531 posiciones de almacenamiento, de las cuales 377 estaban asignadas a FSA/FSK. Esto significa que FSA/FSK utilizaba cerca del 15% de las posiciones del área, mientras que el resto era ocupado por otros materiales. Esta condición evidenciaba una alta dispersión del inventario y una dependencia significativa de un área auxiliar que no estaba completamente orientada a los materiales foco del proyecto.



Figure 2.8: Almacén auxiliar F009. Fuente: registro propio en terreno.

El problema de F009 no era solamente que existiera como almacén auxiliar, sino que su uso generaba complejidad operacional. Al estar parte de los materiales relevantes fuera del concepto central de Werk 12, aumentaban las relocalizaciones internas, los recorridos,

la necesidad de coordinación y el riesgo de baja transparencia en la ubicación real del inventario. Por esta razón, uno de los objetivos de la solución propuesta fue reducir o eliminar la dependencia de F009 para CX y FSA/FSK, consolidando estos materiales en una arquitectura de almacenamiento más compacta, automatizada e integrada.

2.5 Operaciones CX

CX corresponde a una familia o grupo de materiales relevante dentro del proyecto, cuya operación presentaba restricciones claras de capacidad y consolidación. En la situación inicial, CX se encontraba principalmente en Werk 12b, con 562 posiciones activas, y disponía además de 150 posiciones en el área 9600 de Werk 12. Esta distribución mostraba una operación dividida entre distintas zonas, lo que dificultaba una gestión compacta y aumentaba la necesidad de movimientos internos.

El análisis de CX fue especialmente importante porque Nordstern 2026 plantea la consolidación de esta operación dentro de Werk 12. Esto exige que el sistema futuro no solo absorba las posiciones actuales, sino que también permita crecimiento, separación operativa de materiales de alta rotación y compatibilidad con un esquema digitalizado. La automatización mediante módulos verticales se volvió una alternativa atractiva porque permite aumentar densidad de almacenamiento sin requerir una expansión equivalente en superficie de piso, algo especialmente valioso cuando el espacio físico disponible es limitado.

Desde el punto de vista de movimientos SAP, CX presenta una actividad relevante en los movimientos 101, 261 y 315. El movimiento 261, asociado al consumo hacia producción, representa el principal driver operacional, ya que refleja la necesidad de abastecer procesos productivos con frecuencia. Por esta razón, la solución propuesta debía considerar la capacidad de picking y no solamente el volumen de almacenamiento. Una configuración con suficiente capacidad física, pero con bajo rendimiento de acceso, habría sido insuficiente para responder a las necesidades reales de la operación.

2.6 Operaciones FSA/FSK

FSA/FSK corresponde a otro grupo de materiales clave dentro del análisis, con una carga operacional particularmente relevante. A diferencia de CX, cuya problemática se relacionaba fuertemente con la consolidación desde Werk 12b hacia Werk 12, FSA/FSK presentaba un vínculo importante con F009 y con altos volúmenes de consumo hacia producción. El análisis SAP mostró que FSA/FSK generaba un volumen significativo de movimientos 261, superando los 31.000 movimientos anuales promedio en el período estudiado, lo que lo convirtió en uno de los principales drivers de picking dentro del sistema.

La situación de FSA/FSK era relevante porque combinaba dos condiciones problemáticas: alta actividad operacional y dispersión de almacenamiento. Una familia de materiales con alta rotación debería idealmente ubicarse en zonas de acceso eficiente, con baja necesidad de búsqueda, baja relocalización y buena trazabilidad. Sin embargo, al estar parcialmente distribuida en F009 y otras zonas, se generaban movimientos internos adicionales y mayor dependencia de procesos manuales. Esta condición reforzó la necesidad de evaluar una solución automatizada que permitiera concentrar materiales, reducir

relocalizaciones y mejorar la disponibilidad para producción.

En este sentido, FSA/FSK fue determinante para justificar que la solución no debía dimensionarse únicamente a partir del volumen estático de posiciones. Aunque el número de posiciones asignadas a FSA/FSK en F009 era menor que el total del almacén, su impacto operacional era alto debido al volumen de movimientos. Esto demuestra una idea central para la memoria: en logística industrial, no todos los materiales pesan igual en la decisión. Un material con pocas posiciones pero alta frecuencia de picking puede ser más crítico que otro con mayor volumen pero baja rotación. Por ello, el análisis combinó capacidad, movimientos, costos y flujo operacional.

2.7 Nordstern 2026 como marco estratégico

Nordstern 2026 constituye el marco estratégico que da sentido al proyecto. El término Nordstern, traducido como "estrella norte", representa la dirección hacia la cual HYDAC busca orientar la transformación de Werk 12. Esta visión incluye la consolidación de CX bajo un concepto logístico más centralizado, la integración del almacén con SAP EWM, el aumento de densidad de almacenamiento, la reducción de procesos manuales y el avance hacia una operación más digital, trazable y escalable.

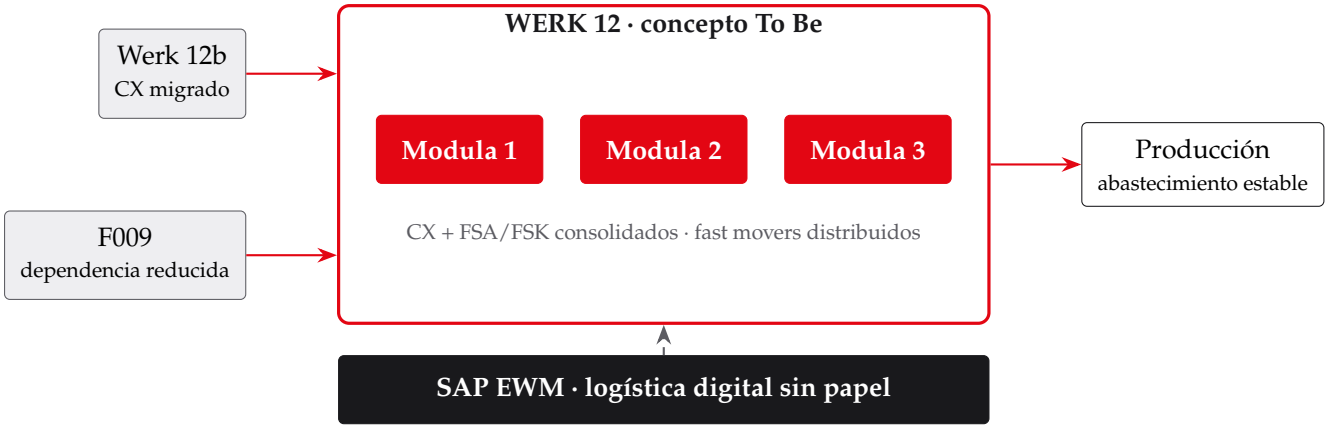


Figure 2.9: Concepto To Be bajo Nordstern 2026: consolidación de CX y FSA/FSK en Werk 12 mediante tres módulos verticales, integración con SAP EWM y reducción de la dependencia de Werk 12b y F009.

La relevancia de Nordstern 2026 para esta memoria es que transforma el problema logístico en una decisión estratégica. Si el objetivo hubiese sido únicamente liberar espacio o comprar una máquina, el análisis podría haberse limitado a comparar capacidad y costo. Sin embargo, el marco Nordstern exige considerar también digitalización, crecimiento futuro, integración de sistemas, reducción de dependencia de almacenes auxiliares y mejora de condiciones operacionales para los trabajadores. Por esta razón, la recomendación final debía cumplir simultáneamente con criterios técnicos, económicos y estratégicos.

Dentro de Nordstern 2026, la integración con SAP EWM ocupa un lugar central. SAP EWM, Extended Warehouse Management, permite gestionar procesos de almacén con mayor granularidad, trazabilidad y control sobre ubicaciones, tareas y movimientos. Para que una solución automatizada sea compatible con esta visión, debe permitir estructuras claras de ubicaciones, confirmación digital de movimientos, integración con flujos de entrada y salida, y capacidad de operar sin depender de procesos manuales o registros

paralelos. En este punto, los módulos verticales de almacenamiento presentan una ventaja importante, ya que pueden integrarse con sistemas de gestión de almacén y contribuir a una operación más ordenada y controlable.

Nordstern 2026 también introduce una dimensión temporal. La solución no debía responder solamente al estado actual de la planta, sino también al crecimiento esperado. Durante el proyecto se trabajó con escenarios de crecimiento de 15

2.8 Actores involucrados y dinámica de trabajo

El desarrollo del proyecto involucró la colaboración entre el equipo de estudiantes, el supervisor de HYDAC, colegas de logística, personal de almacén, áreas de ingeniería, Controlling y proveedores externos. Esta interacción fue especialmente relevante porque gran parte de la información necesaria no estaba completamente consolidada al inicio. Por ello, el trabajo requirió una dinámica activa de levantamiento, validación y discusión, donde los datos cuantitativos se complementaron con conocimiento operativo del personal de planta.



Figure 2.10: Actores involucrados en el desarrollo del proyecto y su relación con el equipo de trabajo.

Durante las primeras semanas se realizaron recorridos por Werk 12, Werk 12b y F009, entrevistas con operadores y supervisores, revisión de documentos internos y levantamiento de información primaria. Posteriormente, el equipo solicitó acceso a datos SAP y trabajó en la interpretación de movimientos 101, 261 y 315, con apoyo del personal de HYDAC para asegurar que los filtros y criterios utilizados fueran correctos. Esta etapa fue fundamental, porque permitió transformar percepciones operacionales en evidencia cuantitativa.

También se estableció contacto con proveedores de soluciones de almacenamiento automatizado, entre ellos Modula, Kardex, Hänel y SSI Schäfer. Esta interacción permitió comparar alternativas técnicas, revisar parámetros como altura, capacidad, dimensiones de bandeja, carga máxima, compatibilidad con SAP EWM, ergonomía y footprint. En el caso de Modula, se profundizó el análisis técnico del modelo ML50D, incluyendo la validación de la configuración de 70 bandejas por lift y 1.680 posiciones KLT por unidad. Esta información fue clave para construir el modelo de capacidad, el análisis financiero y la optimización posterior.

2.9 Importancia del proyecto para HYDAC Werk 12

La importancia del proyecto radica en que permitió pasar de una necesidad estratégica abierta a una recomendación cuantitativamente fundamentada. HYDAC enfrentaba restricciones de capacidad, dispersión de materiales, dependencia de F009, crecimiento esperado y necesidad de integración digital, pero la configuración óptima de automatización no era evidente al comienzo. El trabajo desarrollado permitió ordenar el problema, levantar la información faltante, analizar los datos operacionales y comparar escenarios de inversión de forma estructurada.

El resultado principal fue la recomendación de instalar tres módulos Modula ML50D como configuración óptima para Werk 12. Esta recomendación no surgió únicamente de una preferencia tecnológica, sino de la combinación entre modelamiento de capacidad, evaluación técnico-económica, análisis de escenarios y optimización discreta con rendimientos decrecientes. Desde el punto de vista financiero, tres módulos presentaban el mayor VAN entre las configuraciones factibles. Desde el punto de vista operacional, permitían consolidar CX y FSA/FSK, reducir dependencia de F009, distribuir mejor los fast movers y entregar redundancia. Desde el punto de vista estratégico, se alineaban con Nordstern 2026 y con la futura integración SAP EWM.

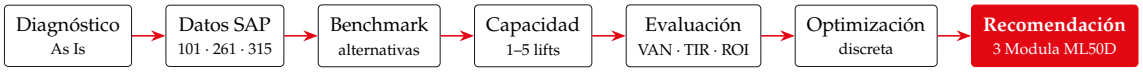


Figure 2.11: Cadena de valor del proyecto: desde una necesidad estratégica abierta hasta una recomendación de inversión cuantitativamente fundamentada.

En términos organizacionales, el proyecto también generó valor porque permitió construir una base común de discusión entre áreas técnicas, logísticas y directivas. La recomendación final no fue presentada como una idea aislada, sino como una propuesta respaldada por datos, cálculos y escenarios. Esto es especialmente relevante en inversiones industriales de alto monto, donde la decisión debe ser defendible ante distintos niveles de la organización. En este sentido, la memoria no solo documenta una práctica profesional, sino también un proceso real de apoyo a la toma de decisiones dentro de una empresa alemana de alta exigencia técnica.

2.10 Síntesis del marco organizacional

El marco organizacional permite comprender que el proyecto desarrollado en HYDAC Werk 12 no puede analizarse como una simple evaluación de equipos de almacenamiento. La empresa se encontraba en un proceso de transformación logística impulsado por Nordstern 2026, con desafíos concretos de capacidad, consolidación, digitalización e integración SAP EWM. Las operaciones CX y FSA/FSK presentaban restricciones distintas pero complementarias, mientras CX requería consolidación y crecimiento dentro de Werk 12, FSA/FSK presentaba una alta carga de picking y dependencia de F009.

La estructura actual, distribuida entre Werk 12b, área 9600 y F009, generaba una operación fragmentada, con movimientos internos relevantes y necesidad de mayor eficiencia. Frente a este escenario, el proyecto permitió levantar información, analizar datos, evaluar tecnologías y proponer una configuración automatizada capaz de responder a las necesidades de crecimiento de la planta. Esta comprensión organizacional es la base para

los capítulos siguientes, donde se profundiza primero en los fundamentos teóricos de la automatización intralogística y luego en la metodología, diagnóstico, modelamiento, evaluación económica y optimización que sustentan la recomendación final.

3 Marco Teórico

3.1 Intralogística

La intralogística corresponde al conjunto de procesos, recursos, tecnologías y decisiones que permiten gestionar los flujos internos de materiales dentro de una organización. A diferencia de la logística externa, que se relaciona con proveedores, transporte, distribución y clientes, la intralogística se concentra en lo que ocurre dentro de la planta, es decir, en cómo los materiales son recibidos, almacenados, trasladados, preparados, entregados a producción y eventualmente reorganizados dentro del sistema. En una empresa manufacturera, esta dimensión es especialmente importante, porque cualquier ineficiencia interna puede traducirse en retrasos de producción, mayores costos de manipulación, pérdida de trazabilidad, sobreutilización de espacios y aumento del trabajo manual.

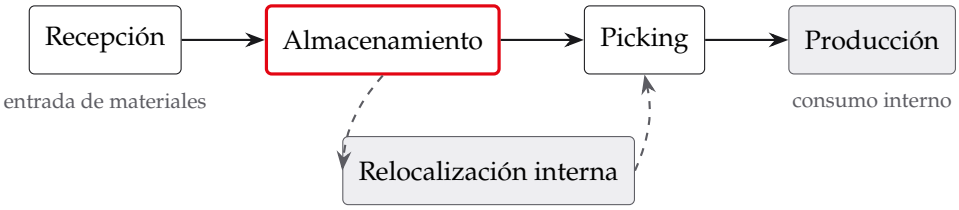


Figure 3.1: Esquema conceptual de la intralogística: flujos internos de materiales desde la recepción hasta el consumo en producción, incluyendo las relocalizaciones internas que no agregan valor directo.

En el contexto de una planta industrial, la intralogística no debe entenderse únicamente como movimiento físico de materiales, sino como un sistema integrado de información, espacio, personas, equipos y decisiones. Un mismo producto puede generar distintas necesidades logísticas según su frecuencia de uso, volumen, peso, criticidad para producción, ubicación física y comportamiento dentro del sistema SAP. Por ello, mejorar la intralogística no significa solamente mover más rápido, sino también reducir movimientos innecesarios, ordenar el flujo, mejorar la visibilidad del inventario y diseñar una estructura que permita tomar decisiones confiables.

Una forma simple de comprender la intralogística es observarla como el punto de conexión entre el almacenamiento y la producción. Cuando producción requiere materiales, el almacén debe responder de forma rápida, segura y trazable. Si los materiales se encuentran dispersos, si existen múltiples almacenes auxiliares, si las ubicaciones no están claramente definidas o si los operadores deben recorrer grandes distancias, entonces el sistema pierde eficiencia incluso cuando el stock existe físicamente. En este sentido, uno

de los objetivos centrales de la intralogística moderna es reducir el tiempo y esfuerzo necesario para que un material disponible se transforme efectivamente en material útil para producción.

En proyectos de automatización industrial, la intralogística adquiere una relevancia aún mayor, porque la incorporación de tecnologías como módulos verticales, sistemas AS/RS o robots móviles autónomos no resuelve automáticamente un problema operacional. Antes de automatizar, es necesario comprender qué materiales se mueven, con qué frecuencia, desde dónde hacia dónde, qué restricciones físicas existen, qué procesos SAP los representan y qué impacto económico tienen esos movimientos. Automatizar un flujo mal entendido puede producir una solución costosa, sobredimensionada o difícil de integrar. Por esta razón, la automatización debe apoyarse primero en un diagnóstico intralogístico sólido.

3.2 Automatización del almacenamiento

La automatización del almacenamiento consiste en incorporar tecnologías capaces de mejorar o reemplazar tareas tradicionales de almacenamiento, búsqueda, picking, relocalización o transporte interno. Estas tecnologías pueden variar desde sistemas simples de ayuda al picking hasta soluciones altamente automatizadas, como módulos verticales de elevación, sistemas shuttle, carruseles, almacenes automáticos de gran altura, robots móviles autónomos o sistemas completamente integrados con software de gestión de almacenes.

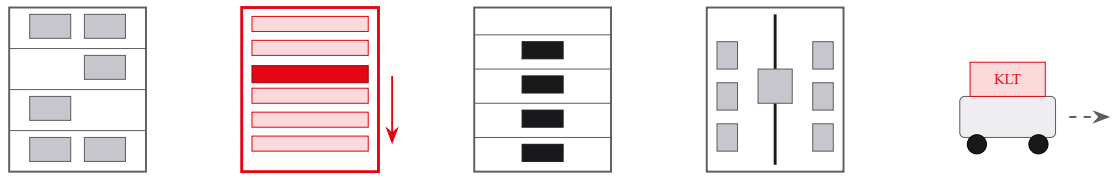


Figure 3.2: Comparación conceptual de tecnologías de almacenamiento y transporte automatizado consideradas en el marco teórico.

El objetivo principal de automatizar un sistema de almacenamiento no es solamente aumentar capacidad, sino mejorar el desempeño global de la operación. Esto incluye reducir tiempos de búsqueda, disminuir desplazamientos, mejorar ergonomía, aumentar precisión de inventario, reducir errores de picking, incrementar densidad de almacenamiento y facilitar la integración digital. En sistemas manuales, gran parte del tiempo de los operadores puede perderse caminando hacia ubicaciones, buscando material o reorganizando stock. En cambio, en sistemas automatizados, el principio se invierte: el material se acerca al operador o se gestiona mediante sistemas de ubicación y transporte más controlados.

La automatización también tiene una dimensión económica importante. Toda tecnología requiere inversión inicial, costos de mantenimiento, integración con sistemas existentes y eventualmente cambios en layout o procesos. Por lo mismo, una alternativa

automatizada debe evaluarse considerando tanto beneficios directos como indirectos. Entre los beneficios directos se encuentran los ahorros de personal, reducción de superficie, menor costo de inventario o menor número de relocalizaciones internas. Entre los beneficios indirectos se encuentran mejor ergonomía, mayor seguridad, menor variabilidad operacional, mejor trazabilidad y capacidad de crecimiento futuro.

En el caso de HYDAC Werk 12, la automatización del almacenamiento se vuelve relevante porque el problema combina varios factores simultáneos: necesidad de capacidad, dispersión de inventario, dependencia de F009, alto volumen de movimientos hacia producción, requerimientos de SAP EWM y crecimiento definido bajo Nordstern 2026. Esto obliga a evaluar la automatización no como una compra aislada de maquinaria, sino como parte de una arquitectura intralogística futura. La pregunta clave no es simplemente si automatizar conviene, sino qué configuración de automatización permite equilibrar capacidad, operación, costo y estrategia.

3.2.a Criterios para evaluar tecnologías de almacenamiento

La evaluación de tecnologías de almacenamiento debe considerar criterios técnicos, operacionales, económicos y estratégicos. Desde el punto de vista técnico, se deben revisar dimensiones físicas, altura disponible, capacidad por unidad, carga máxima, compatibilidad con los materiales existentes, requerimientos de instalación y restricciones del edificio. Desde el punto de vista operacional, se deben analizar velocidad de picking, ergonomía, facilidad de uso, confiabilidad, redundancia, mantenimiento y capacidad para operar con distintos tipos de materiales.

Desde el punto de vista económico, deben evaluarse inversión inicial, costos de operación, costos de mantenimiento, vida útil esperada, ahorros anuales, payback, VAN, TIR y ROI. Desde el punto de vista estratégico, la solución debe alinearse con los planes de crecimiento, digitalización, integración de sistemas y flexibilidad futura. Una alternativa puede ser técnicamente atractiva, pero no necesariamente adecuada si no cumple los objetivos de largo plazo de la organización.

En una decisión real, estos criterios no tienen el mismo peso. Por ejemplo, una solución de bajo costo puede ser insuficiente si no tiene integración con SAP EWM o si no permite sostener el crecimiento futuro. Del mismo modo, una solución de gran capacidad puede no ser recomendable si genera sobredimensionamiento, baja utilización y bajo retorno marginal. Por eso, el proceso de evaluación debe combinar análisis cualitativo y cuantitativo.

3.3 Vertical Lift Modules

Los Vertical Lift Modules, conocidos como VLM, son sistemas automatizados de almacenamiento vertical que utilizan bandejas internas para guardar materiales en una estructura compacta de gran altura. El principio de funcionamiento se basa en almacenar productos en bandejas y transportar automáticamente la bandeja requerida hacia una estación de picking ubicada a una altura ergonómica para el operador. De esta forma, el operador no camina hacia el material, sino que el sistema acerca el material al operador.

La principal ventaja de un VLM es su capacidad para aumentar la densidad de almacenamiento en superficies reducidas. Al utilizar la altura disponible del edificio, estos

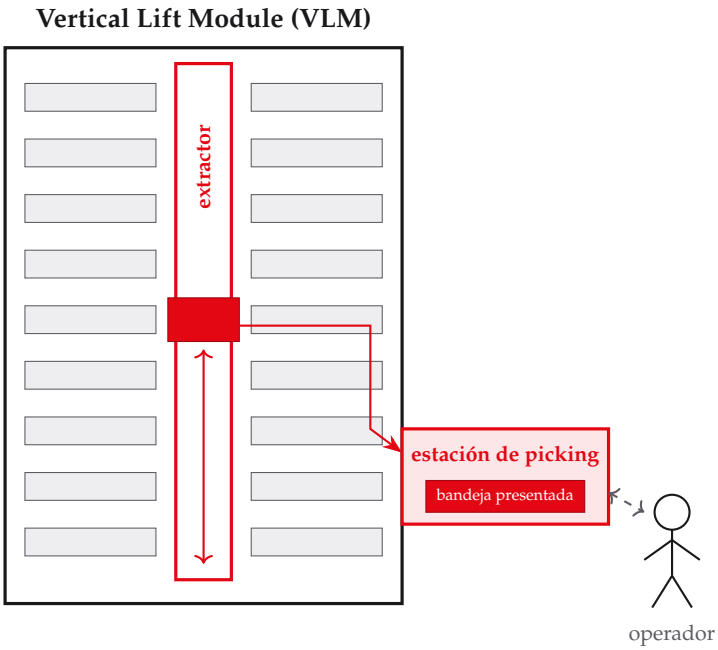


Figure 3.3: Principio de funcionamiento de un módulo de elevación vertical: bandejas almacenadas en dos columnas, extractor central y presentación de la bandeja en la estación de picking.

sistemas pueden almacenar una cantidad importante de materiales en una huella física mucho menor que la requerida por racks tradicionales. Esto resulta especialmente útil en plantas donde el espacio de piso es limitado o costoso, como ocurre en instalaciones industriales existentes que deben crecer sin expandir significativamente su infraestructura.

Otra ventaja relevante es la mejora ergonómica. En sistemas manuales, los operadores pueden verse obligados a agacharse, estirarse, subir escaleras, manipular cargas en posiciones incómodas o recorrer largas distancias. En cambio, un VLM presenta la bandeja en una zona de trabajo accesible, reduciendo movimientos repetitivos y riesgos asociados a posturas inadecuadas. Esto no solo mejora la seguridad, sino que también permite estabilizar el rendimiento del proceso de picking.

Desde el punto de vista del control de inventario, un VLM puede integrarse con sistemas de gestión de almacén, permitiendo registrar ubicaciones, confirmar movimientos, guiar tareas y reducir errores. Esta integración es especialmente importante cuando la empresa busca avanzar hacia SAP EWM, ya que el sistema físico debe ser compatible con una lógica digital de ubicaciones, confirmaciones y trazabilidad en tiempo real. Por lo tanto, un VLM no debe ser visto únicamente como una máquina de almacenamiento, sino como un componente físico de un sistema digital de gestión de materiales.

3.3.a Capacidad y utilización en sistemas VLM

La capacidad de un VLM depende de múltiples factores, entre ellos la altura total del equipo, dimensiones de bandeja, altura de los contenedores, separación entre bandejas, peso máximo por bandeja y criterios de seguridad. En la práctica, la capacidad nominal puede diferir de la capacidad operacional, porque se deben considerar tolerancias, variabilidad de materiales, restricciones de peso, ergonomía, crecimiento futuro y necesidad

de dejar holgura para cambios en la mezcla de productos.

La utilización de un sistema automatizado no debe buscar necesariamente el 100%. En almacenamiento manual, una alta ocupación puede parecer positiva, pero en sistemas automatizados una utilización excesiva puede generar congestión, baja flexibilidad, dificultad para separar materiales de alta rotación y menor capacidad de respuesta ante cambios. Por ello, en proyectos industriales se suele trabajar con buffers o tolerancias que permitan mantener estabilidad operacional. En el caso de una estrategia de crecimiento, esta holgura es aún más importante, ya que el sistema debe absorber nuevas referencias, variaciones de demanda y cambios futuros en la cartera de productos.

3.3.b VLM como solución para consolidación

Un VLM es especialmente útil cuando existen materiales dispersos entre distintas zonas y se busca consolidarlos dentro de un espacio más compacto y controlado. La consolidación permite reducir movimientos internos, disminuir dependencias de almacenes auxiliares, mejorar trazabilidad y acercar materiales críticos a los puntos de consumo. Sin embargo, la consolidación no depende solo de la capacidad física del equipo. También requiere evaluar qué materiales se consolidan, cuál es su frecuencia de movimiento, qué familias deben separarse, qué nivel de redundancia se requiere y cómo se distribuyen los fast movers.

En este sentido, la decisión sobre cuántos VLM instalar no puede basarse solamente en una suma de posiciones. Una unidad puede ser suficiente desde el punto de vista volumétrico, pero insuficiente desde el punto de vista operacional si concentra demasiado picking en una sola estación, no entrega redundancia o no permite separar adecuadamente materiales de alta rotación. Esta diferencia entre capacidad física y capacidad operacional será especialmente importante en los capítulos posteriores.

3.4 SAP y SAP EWM

SAP es un sistema ERP ampliamente utilizado en empresas industriales para integrar información de compras, producción, inventario, finanzas, ventas y logística. En el ámbito de almacenes, SAP permite registrar movimientos de materiales, ubicaciones, entradas, consumos, relocalizaciones y stock disponible. Para proyectos intralogísticos, el análisis de datos SAP es especialmente valioso porque permite transformar la operación diaria en evidencia cuantitativa, mostrando qué materiales se mueven, con qué frecuencia, en qué zonas y mediante qué tipos de transacción.

En esta memoria, los movimientos SAP son relevantes porque permiten comprender el comportamiento real de CX y FSA/FSK. En particular, los movimientos 101, 261 y 315 representan procesos fundamentales dentro del flujo de materiales. El movimiento 101 se asocia a recepción de mercadería, el movimiento 261 se vincula con consumo hacia producción y el movimiento 315 se relaciona con relocalizaciones internas. Esta clasificación permite diferenciar entre materiales que entran al sistema, materiales que salen hacia producción y materiales que se mueven internamente sin necesariamente agregar valor directo al cliente.

SAP EWM, Extended Warehouse Management, corresponde a una solución más avanzada para la gestión de almacenes, orientada a controlar procesos con mayor detalle,

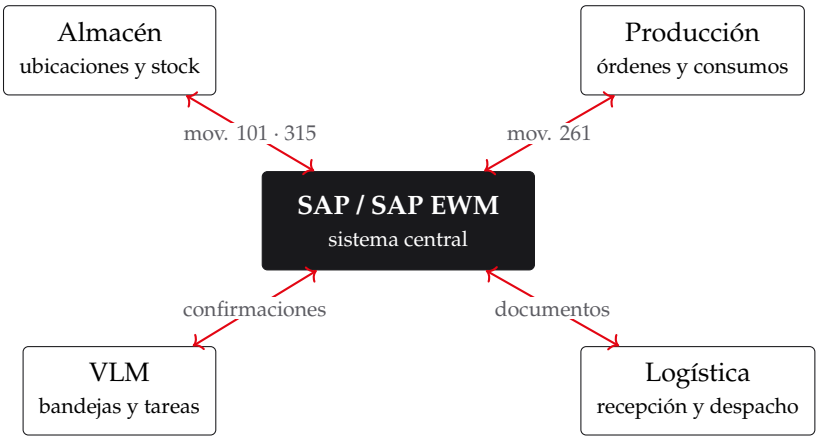


Figure 3.4: SAP como sistema central de información: cada proceso físico del almacén queda registrado mediante movimientos estandarizados, lo que permite el análisis cuantitativo de la operación.

gestionar ubicaciones, tareas, estrategias de picking, put away, reposición, inventario y trazabilidad. En un contexto de automatización, SAP EWM permite conectar la lógica digital del almacén con los equipos físicos, como VLM, AMR u otros sistemas automatizados. Esta conexión es importante porque una solución automatizada pierde valor si no está integrada con la información que organiza el flujo de materiales.

3.4.a Importancia de los movimientos SAP en la toma de decisiones

Los movimientos SAP permiten identificar los principales drivers operacionales de un sistema de almacenamiento. Por ejemplo, un material con muchas posiciones pero pocos movimientos puede ocupar espacio, pero no necesariamente generar alta carga de picking. En cambio, un material con menos posiciones pero muchos movimientos 261 puede ser mucho más crítico para la operación diaria. Por ello, una decisión de automatización no debe basarse únicamente en inventario estático, sino también en frecuencia de movimientos.

El análisis de movimientos también permite identificar desperdicios operacionales. En particular, un alto volumen de movimientos 315 puede indicar relocalizaciones frecuentes, dispersión de inventario o necesidad de reorganizar stock entre ubicaciones. Aunque estos movimientos pueden ser necesarios en ciertos casos, desde una perspectiva de eficiencia representan trabajo interno que no necesariamente agrega valor. Por ello, reducir movimientos 315 puede ser un objetivo importante dentro de una estrategia de consolidación y automatización.

3.4.b Integración entre VLM y SAP EWM

La integración entre VLM y SAP EWM permite que el equipo automatizado funcione como parte del sistema digital del almacén. Esto implica que las ubicaciones internas del VLM deben estar representadas dentro de la estructura de almacén, que las tareas de picking y almacenamiento deben generarse o confirmarse en el sistema y que el operador debe recibir instrucciones claras sobre qué material mover, desde dónde y hacia dónde. Esta integración contribuye a reducir errores, aumentar trazabilidad y mejorar la confiabilidad del inventario.

En una operación futura alineada con Nordstern 2026, la integración con SAP EWM es un requisito estratégico, porque permite pasar desde procesos parcialmente manuales o basados en registros físicos hacia una operación más digital y controlada. En este sentido, el VLM actúa como una solución física que debe dialogar con una lógica digital. Por lo tanto, su evaluación debe considerar no solo dimensiones, capacidad y costo, sino también compatibilidad con sistemas de información.

3.5 Modelamiento de capacidad

El modelamiento de capacidad consiste en representar cuantitativamente la relación entre demanda de almacenamiento, capacidad disponible y restricciones del sistema. En el contexto de esta memoria, la capacidad no se refiere únicamente al número de posiciones físicas, sino también a la capacidad efectiva de operar el sistema de forma estable, considerando crecimiento, utilización, fast movers, redundancia y restricciones del layout.

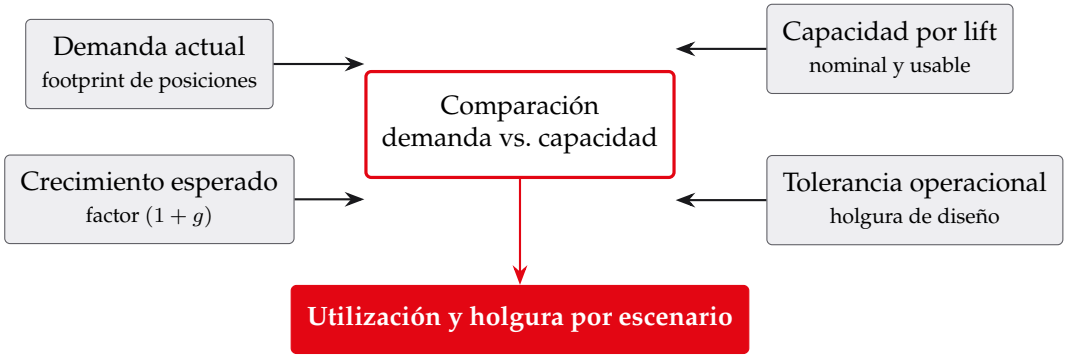


Figure 3.5: Modelo conceptual de capacidad: la demanda proyectada se compara con la capacidad nominal y usable de cada configuración para obtener utilización y holgura operacional.

Una formulación básica de capacidad puede expresarse como:

$$Capacidad\ total = n \cdot K \tag{3.1}$$

donde (n) representa el número de unidades instaladas y (K) la capacidad efectiva de cada unidad. Sin embargo, esta formulación simple debe complementarse con restricciones de utilización y crecimiento. Si se considera un factor de utilización máxima (u), la capacidad usable puede expresarse como:

$$Capacidad\ usable = n \cdot K \cdot u \tag{3.2}$$

donde (u) puede representar una política operacional, por ejemplo utilizar solo un porcentaje de la capacidad nominal para mantener flexibilidad, evitar saturación y permitir crecimiento futuro.

La demanda futura de almacenamiento puede modelarse a partir de la demanda actual y un factor de crecimiento:

$$D_f = D_0 \cdot (1 + g) \tag{3.3}$$

donde (D_f) es la demanda futura, (D_0) la demanda actual y (g) el crecimiento esperado. Esta relación es simple, pero muy útil para evaluar si una configuración es suficiente no

solo para el presente, sino también para el escenario futuro esperado.

3.5.a Capacidad física versus capacidad operacional

Una distinción fundamental en esta memoria es la diferencia entre capacidad física y capacidad operacional. La capacidad física corresponde a cuántas posiciones pueden almacenarse en un sistema. La capacidad operacional, en cambio, considera si ese sistema puede sostener el flujo real de picking, consumo, entrada, salida y relocalización sin generar congestión, tiempos de espera o riesgos de continuidad.

Un ejemplo muy claro es el caso de un VLM individual. Si una unidad tiene capacidad suficiente para almacenar el volumen total requerido, podría parecer suficiente desde el punto de vista físico. Sin embargo, si todos los materiales de alta rotación quedan concentrados en una sola unidad, el sistema puede generar cuello de botella, porque solo puede presentar una bandeja a la vez y no entrega redundancia ante fallas o mantenciones. Por ello, una solución técnicamente factible puede no ser operacionalmente recomendable.

Esta distinción es muy importante para justificar por qué el análisis no debe limitarse a la capacidad nominal. En el caso estudiado, la decisión debía considerar separación de materiales, distribución de fast movers, crecimiento de 15% a 25%, reducción de dependencia de F009 y compatibilidad con una operación futura más digitalizada. Por lo tanto, el número óptimo de módulos no surge de una suma directa de posiciones, sino de una evaluación integral entre capacidad, operación y estrategia.

3.6 Optimización discreta

La optimización discreta es una rama de la optimización matemática donde las variables de decisión toman valores discretos, generalmente enteros o binarios. Este tipo de modelamiento es especialmente útil en decisiones industriales donde no se puede elegir una cantidad continua, sino un número entero de recursos, máquinas, turnos, vehículos, ubicaciones o equipos. En esta memoria, la variable principal corresponde al número de módulos verticales a instalar, lo cual naturalmente toma valores enteros.

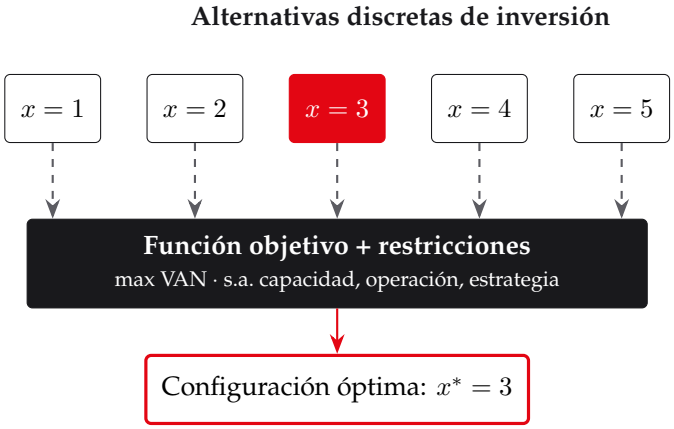


Figure 3.6: Esquema conceptual de la optimización discreta: el número de módulos solo puede tomar valores enteros y la mejor alternativa se selecciona evaluando la función objetivo bajo restricciones.

Una forma general de un problema de optimización puede expresarse como:

$$\max f(x) \tag{3.4}$$

sujeto a:

$$g_i(x) \leq b_i \tag{3.5}$$

$$x \in \mathbb{Z} \tag{3.6}$$

donde (f(x)) representa la función objetivo, $(g_i(x))$ las restricciones del sistema, (b_i) los límites disponibles y (x) la variable de decisión entera. En el contexto del proyecto, (x) puede representar el número de VLM instalados y la función objetivo puede asociarse al beneficio económico, al VAN o a otra métrica de valor.

3.6.a Programación entera mixta

La programación entera mixta, conocida como Mixed Integer Programming o MIP, permite combinar variables continuas y variables enteras o binarias dentro de un mismo modelo. Esta herramienta es útil cuando una decisión involucra seleccionar alternativas discretas y al mismo tiempo evaluar costos, capacidades o flujos continuos. Por ejemplo, se puede definir una variable binaria para indicar si un módulo se instala o no, y luego calcular el beneficio total asociado a esa decisión.

Una formulación binaria simple puede utilizar variables (y_k), donde:

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{si el módulo } k \text{ se instala} \\ 0, & \text{si el módulo } k \text{ no se instala} \end{cases} \tag{3.7}$$

El número total de módulos instalados puede expresarse como:

$$x = \sum_{k=1}^{N} y_k \tag{3.8}$$

A partir de esta estructura, se pueden incorporar restricciones de capacidad, presupuesto o espacio físico. Por ejemplo:

$$K \sum_{k=1}^{N} y_k \geq D \tag{3.9}$$

donde (K) es la capacidad por módulo y (D) la demanda mínima requerida. Esta restricción asegura que la configuración seleccionada entregue capacidad suficiente.

3.6.b Rendimientos decrecientes

Los rendimientos decrecientes aparecen cuando cada unidad adicional de inversión genera un beneficio marginal menor que la unidad anterior. En proyectos de automatización, esto es muy común. El primer equipo puede capturar gran parte de los ahorros evidentes, como reducir recorridos, consolidar materiales críticos o eliminar procesos manuales intensivos. El segundo equipo puede seguir aportando beneficios importantes, pero normalmente menores. A partir de cierto punto, los equipos adicionales entregan

principalmente holgura, redundancia o comodidad operacional, pero con menor impacto económico directo.

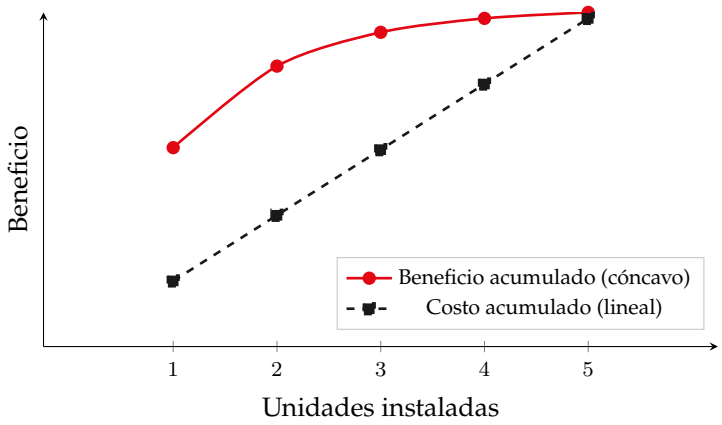


Figure 3.7: Rendimientos decrecientes: el beneficio marginal de cada unidad adicional disminuye, mientras el costo crece linealmente; a partir de cierto punto la inversión adicional deja de crear valor.

Una forma simple de representar rendimientos decrecientes es mediante coeficientes marginales (α_i), donde:

$$\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_4 > \alpha_5 \tag{3.10}$$

El ahorro total para (x) unidades puede expresarse como:

$$S(x) = S_1 \sum_{i=1}^{x} \alpha_i \tag{3.11}$$

donde (S_1) representa el ahorro de la primera unidad y (α_i) el aporte relativo de cada unidad adicional. Esta formulación permite capturar de manera sencilla una realidad industrial importante, que no todas las unidades instaladas generan el mismo valor económico.

En la toma de decisiones, los rendimientos decrecientes permiten explicar por qué una configuración con más equipos no siempre es mejor. Puede ocurrir que cuatro o cinco equipos entreguen mayor capacidad y más ahorro absoluto, pero al mismo tiempo reduzcan el VAN debido a la inversión adicional. Por lo tanto, la configuración óptima se encuentra donde el beneficio marginal aún justifica el costo marginal.

3.7 Evaluación técnico-económica

La evaluación técnico-económica consiste en analizar una alternativa de inversión considerando tanto su viabilidad técnica como su desempeño económico. En proyectos industriales, esta evaluación es fundamental porque una solución puede ser técnicamente posible, pero económicamente débil, o al revés, financieramente atractiva, pero insuficiente desde el punto de vista operacional. Por ello, la decisión debe integrar ambos enfoques.

Desde el punto de vista técnico, se revisan variables como capacidad, compatibilidad con el layout, integración con SAP EWM, ergonomía, seguridad, rendimiento de picking,

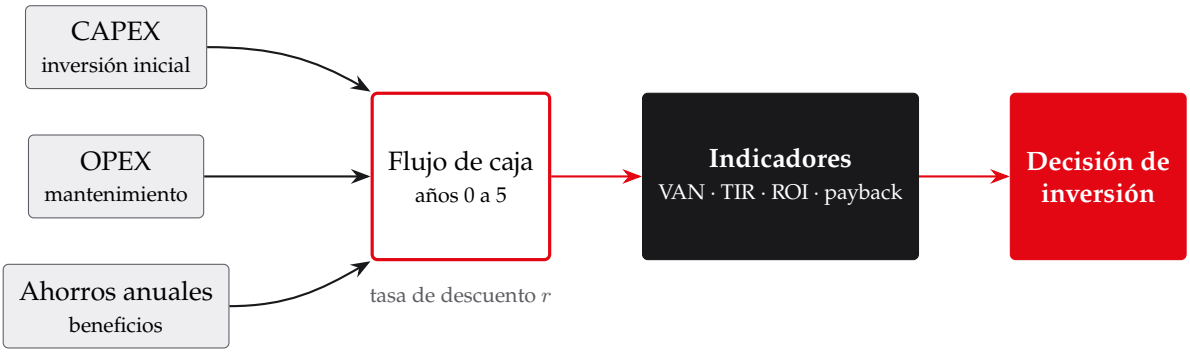


Figure 3.8: Estructura conceptual de la evaluación técnico-económica: costos y beneficios se integran en un flujo de caja descontado que alimenta los indicadores financieros de decisión.

posibilidad de crecimiento y restricciones físicas. Desde el punto de vista económico, se revisan inversión inicial, mantenimiento, ahorros anuales, flujos de caja y métricas financieras. La combinación de ambas perspectivas permite evitar decisiones incompletas.

En esta memoria, la evaluación técnico-económica cumple un rol central porque la recomendación final no se basa únicamente en la capacidad de los módulos Modula ML50D, sino en su capacidad para generar valor operacional y financiero. Esto incluye ahorro de personal, reducción del esfuerzo de inventario, liberación de superficie, reducción de relocalizaciones internas y eliminación de posiciones redundantes. Estos beneficios se traducen luego en flujos de caja que permiten calcular indicadores financieros comparables entre escenarios.

3.7.a CAPEX y OPEX

CAPEX corresponde al gasto de capital o inversión inicial necesaria para adquirir e implementar un activo. En proyectos de automatización, el CAPEX puede incluir compra de equipos, instalación, adaptación del layout, integración de sistemas y otros costos iniciales. OPEX corresponde a los costos operacionales recurrentes, como mantenimiento, energía, soporte, licencias o costos asociados al uso continuo del sistema.

La distinción entre CAPEX y OPEX es importante porque una alternativa con menor inversión inicial no siempre es más conveniente si genera mayores costos de operación o menor ahorro anual. Del mismo modo, una alternativa con mayor CAPEX puede justificarse si reduce fuertemente costos operativos y genera retornos suficientes dentro del horizonte de evaluación.

3.8 Indicadores financieros

Los indicadores financieros permiten comparar alternativas de inversión a partir de criterios cuantitativos. En esta memoria se consideran principalmente VAN, TIR, ROI y payback. Cada indicador entrega una perspectiva distinta, por lo que no deben interpretarse de manera aislada. Una alternativa puede tener un ROI muy alto pero no ser suficiente operacionalmente, o puede tener una TIR menor pero entregar mayor robustez estratégica. Por ello, los indicadores financieros deben ser interpretados junto con restricciones de capacidad, crecimiento y operación.

3.8.a Valor Actual Neto

El Valor Actual Neto, o VAN, mide el valor económico de una inversión considerando el valor del dinero en el tiempo. Se calcula descontando los flujos de caja futuros a una tasa de descuento y restando la inversión inicial. Su forma general es:

$$VAN = \sum_{t=1}^{T} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 \tag{3.12}$$

donde (CF_t) es el flujo de caja en el período (t), (r) es la tasa de descuento, (T) es el horizonte de evaluación e (I_0) es la inversión inicial. Si el VAN es positivo, el proyecto crea valor bajo la tasa de descuento utilizada. Si el VAN es negativo, el proyecto destruye valor económico.

En decisiones industriales, el VAN es especialmente relevante porque permite comparar escenarios con diferentes niveles de inversión y ahorro. En el caso de múltiples módulos, el VAN puede aumentar hasta cierto punto y luego disminuir si los beneficios adicionales no compensan el CAPEX incremental. Por esta razón, el VAN es un indicador muy útil para identificar configuraciones óptimas bajo rendimientos decrecientes.

3.8.b Tasa Interna de Retorno

La Tasa Interna de Retorno, o TIR, corresponde a la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. En términos simples, representa la rentabilidad interna del proyecto. Se define como la tasa (r) que satisface:

$$0 = \sum_{t=1}^{T} \frac{CF_t}{(1+TIR)^t} - I_0 \tag{3.13}$$

Una TIR mayor que la tasa mínima exigida por la empresa indica que el proyecto es atractivo desde el punto de vista financiero. Sin embargo, la TIR debe interpretarse con cuidado, porque puede favorecer proyectos pequeños con retornos porcentuales muy altos, aunque no necesariamente sean los más adecuados estratégicamente. Por ejemplo, una configuración con un solo equipo puede tener una TIR muy alta, pero no entregar suficiente capacidad, redundancia o alineación con el crecimiento futuro.

3.8.c Retorno sobre la inversión

El Retorno sobre la Inversión, o ROI, mide la relación entre el beneficio obtenido y la inversión realizada. Una formulación simple para un horizonte de evaluación es:

$$ROI = \frac{\sum_{t=1}^{T} CF_t - I_0}{I_0} \cdot 100 \tag{3.14}$$

El ROI permite expresar cuánto se recupera o gana en relación con el capital invertido. Es un indicador intuitivo y útil para comunicar resultados a audiencias ejecutivas. Sin embargo, al igual que la TIR, no debe utilizarse como único criterio, ya que puede no capturar adecuadamente restricciones operacionales, riesgos, capacidad futura o alineación estratégica.

3.8.d Período de recuperación

El período de recuperación, o payback, indica cuánto tiempo tarda una inversión en recuperar el capital inicial mediante los flujos de caja generados. Su forma simple puede expresarse como:

$$Payback = \frac{I_0}{CF_{anual}} \tag{3.15}$$

cuando los flujos anuales son constantes. Este indicador es útil porque muestra la rapidez con que una inversión reduce su exposición financiera. En entornos industriales, un payback corto suele ser atractivo, especialmente cuando la inversión debe competir con otros proyectos internos. Sin embargo, el payback no considera necesariamente el valor del dinero en el tiempo ni los beneficios posteriores al período de recuperación, por lo que debe complementarse con VAN, TIR y ROI.

3.9 Análisis de escenarios

El análisis de escenarios permite comparar distintas configuraciones posibles bajo un conjunto común de supuestos. En esta memoria, los escenarios corresponden a distintas cantidades de módulos verticales, desde una hasta cinco unidades. Cada escenario se evalúa considerando inversión, capacidad, ahorro anual, indicadores financieros y restricciones operacionales. Esta lógica permite evitar una decisión binaria del tipo automatizar o no automatizar, y en cambio permite responder una pregunta más realista: qué nivel de automatización conviene implementar.

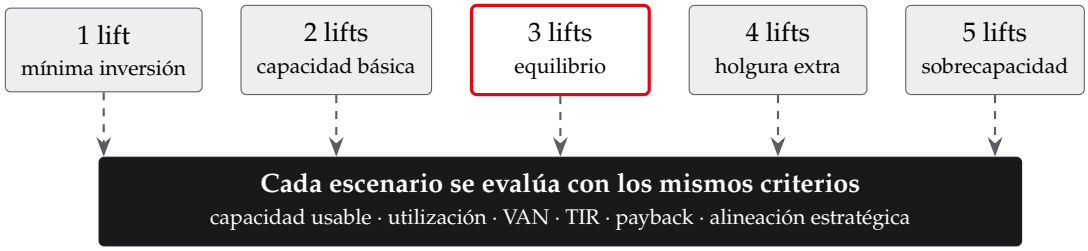


Figure 3.9: Análisis de escenarios: las cinco configuraciones discretas se evalúan bajo criterios comunes para permitir una comparación consistente.

El análisis de escenarios es especialmente útil cuando existen trade offs, es decir, compensaciones entre variables. Por ejemplo, una configuración con pocos módulos puede tener excelente retorno porcentual, pero baja capacidad o poca redundancia. Una configuración con muchos módulos puede entregar gran holgura, pero menor beneficio marginal. El escenario óptimo no siempre es el que maximiza una sola variable, sino aquel que ofrece el mejor equilibrio entre criterios financieros, operacionales y estratégicos.

3.10 Automatización del transporte interno mediante AMR

Los Autonomous Mobile Robots, conocidos como AMR, son robots móviles capaces de transportar materiales de forma autónoma dentro de una planta, utilizando sensores, navegación y sistemas de planificación de rutas. A diferencia de tecnologías más rígidas, como transportadores fijos o rutas completamente predefinidas, los AMR pueden

adaptarse a cambios en el entorno, modificar recorridos y operar en espacios compartidos con personas y otros equipos, siempre que se cumplan los requisitos de seguridad correspondientes.

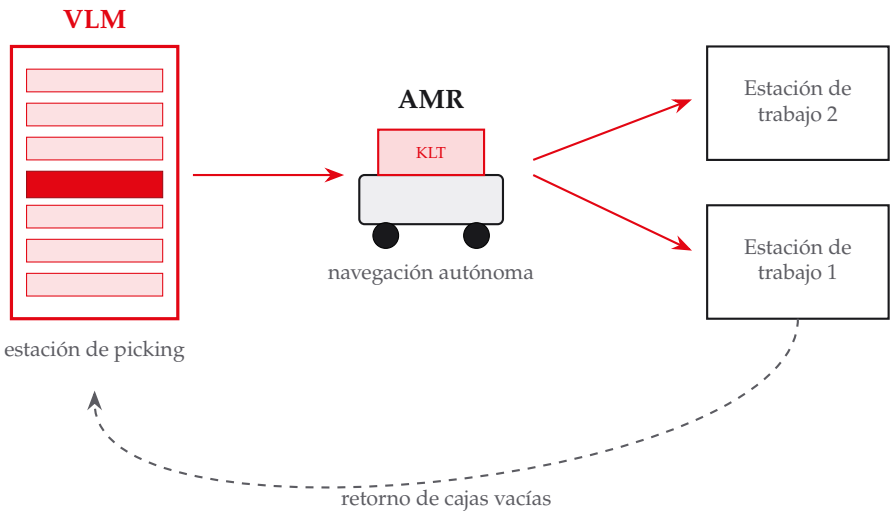


Figure 3.10: Concepto de transporte interno con AMR: el robot móvil autónomo traslada contenedores KLT entre el sistema de almacenamiento vertical y las estaciones de trabajo, retornando cajas vacías.

En un sistema donde los materiales se concentran en módulos verticales, el transporte interno adquiere una nueva importancia. Si los VLM centralizan el almacenamiento, entonces es necesario definir cómo los materiales llegarán desde los módulos hacia las estaciones de trabajo y cómo retornarán los contenedores vacíos. Esta función puede mantenerse manual, pero también puede automatizarse mediante AMR. Por ello, la automatización del almacenamiento y la automatización del transporte interno deben verse como componentes complementarios dentro de una arquitectura intralogística.

La selección de un AMR no debe basarse únicamente en velocidad o capacidad de carga. En un entorno industrial, criterios como seguridad, certificaciones, capacidad de integración, scheduling, escalabilidad, facilidad de mantenimiento y costo total de propiedad pueden ser más relevantes que el precio inicial. Una solución barata pero difícil de integrar puede terminar generando mayores costos y riesgos. Del mismo modo, una solución técnicamente avanzada puede no ser necesaria si el proceso todavía no requiere esa complejidad.

3.10.a Planificación de rutas AMR

La planificación de rutas define cómo el robot se moverá dentro de la planta para cumplir tareas de abastecimiento, retiro de cajas vacías o transporte interno. Dos esquemas típicos son la ruta circular y la entrega punto a punto. En una ruta circular, el robot sigue un circuito fijo pasando por estaciones predefinidas. En una entrega punto a punto, el robot ejecuta tareas específicas desde un origen hacia un destino, buscando normalmente reducir trayectos innecesarios.

La ruta circular puede ser más simple para escenarios con demanda regular y múltiples robots, porque permite organizar zonas y ciclos de operación. Sin embargo, en escenarios

de demanda variable o con un solo robot, puede generar recorridos inútiles si el robot debe pasar por estaciones que no requieren atención. La entrega punto a punto, en cambio, puede ser más eficiente cuando las necesidades son dinámicas, ya que permite responder directamente a la estación que requiere material o retiro de contenedores.

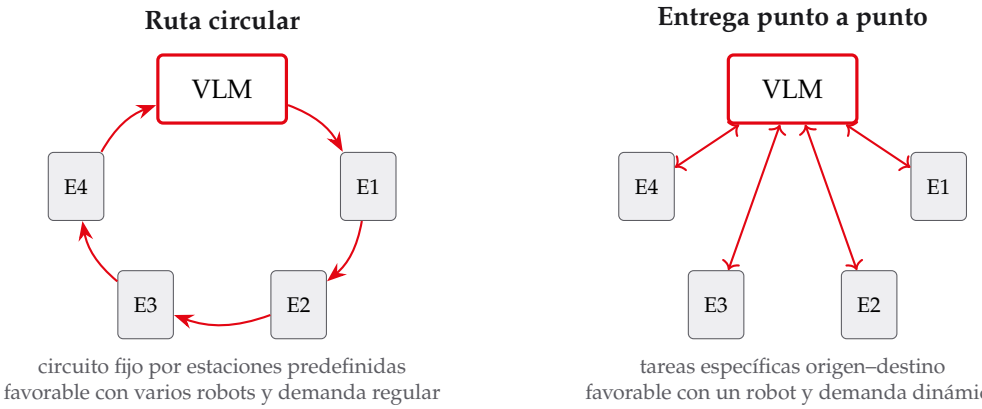


Figure 3.11: Comparación entre los dos esquemas de ruteo AMR evaluados: ruta circular y entrega punto a punto.

En el contexto de esta memoria, el análisis AMR se considera como una extensión del concepto de automatización intralogística. Los VLM resuelven la consolidación y almacenamiento de materiales, mientras que los AMR pueden apoyar el transporte entre los módulos y las estaciones de trabajo. De esta manera, la automatización puede evolucionar desde un primer núcleo de almacenamiento automático hacia una arquitectura más completa de flujo interno digitalizado.

3.11 Relación entre teoría y caso aplicado

Los conceptos presentados en este marco teórico permiten construir la base para analizar el caso HYDAC Werk 12. La intralogística entrega el enfoque sistémico para comprender los flujos internos de materiales. La automatización del almacenamiento permite evaluar tecnologías como VLM y Modula ML50D. SAP y SAP EWM entregan la base digital para comprender movimientos, ubicaciones y trazabilidad. El modelamiento de capacidad permite comparar demanda y capacidad efectiva. La optimización discreta permite seleccionar el número adecuado de módulos. La evaluación técnico-económica permite justificar la inversión mediante indicadores financieros. Finalmente, el análisis AMR permite proyectar una etapa posterior de automatización del transporte interno.

La relación entre estos conceptos es fundamental para evitar una interpretación parcial del proyecto. Si solo se observa la automatización, se pierde la dimensión económica. Si solo se observa el VAN, se pierde la capacidad operacional. Si solo se observa la capacidad nominal, se ignoran los movimientos SAP y los fast movers. Si solo se observa el layout, se pierde la estrategia Nordstern 2026. Por ello, la memoria combina varias herramientas de Ingeniería Civil Industrial para construir una recomendación integrada y defendible.

En síntesis, el marco teórico muestra que la decisión sobre automatización de almacenamiento no debe reducirse a una comparación de equipos, sino que debe entenderse como una decisión de diseño y evaluación de sistemas. La solución recomendada debe ser técnicamente factible, operacionalmente robusta, económicamente atractiva y estratégi-

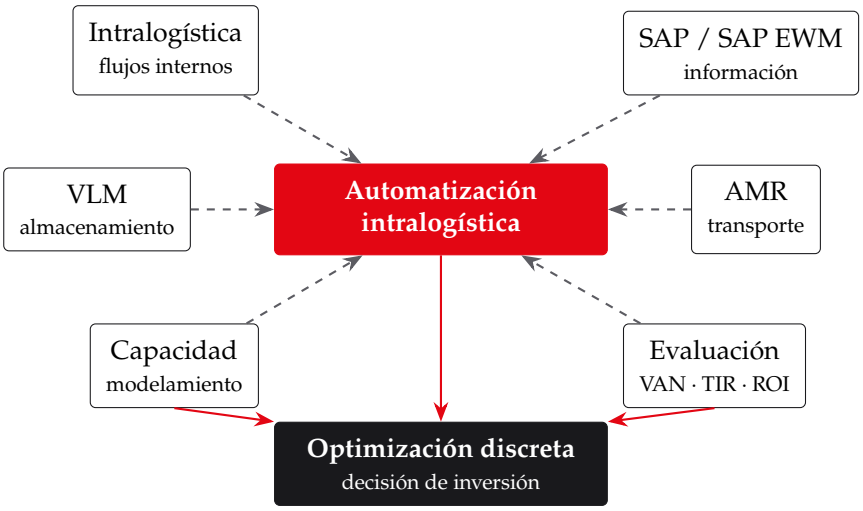


Figure 3.12: Mapa conceptual del marco teórico: los fundamentos de intralogística, SAP, VLM, AMR, capacidad y evaluación económica convergen en la optimización discreta que sustenta la decisión de inversión.

camente coherente. Esta lógica será aplicada en los capítulos siguientes para diagnosticar el sistema actual, modelar la capacidad requerida, evaluar alternativas, estimar beneficios económicos y determinar la configuración óptima de automatización para HYDAC Werk 12.

4 Metodología

4.1 Diseño metodológico

La metodología utilizada en esta memoria corresponde a un enfoque aplicado de ingeniería industrial, orientado a diagnosticar, modelar, evaluar y optimizar una decisión real de automatización intralogística dentro de HYDAC Werk 12. El trabajo no se desarrolló como un ejercicio puramente teórico ni como una simple descripción de una práctica profesional, sino como un proceso estructurado de apoyo a la toma de decisiones, donde fue necesario transformar una necesidad estratégica de la empresa en una recomendación técnica y económicamente defendible.

El punto de partida del proyecto fue una problemática abierta. HYDAC enfrentaba restricciones de capacidad, dispersión de materiales entre Werk 12b, el área 9600 y F009, presión de crecimiento asociada a Nordstern 2026 y una necesidad de avanzar hacia una operación más digitalizada e integrada con SAP EWM. Sin embargo, al inicio no existía una única solución definida ni una base completa de información que permitiera decidir directamente cuántos equipos instalar, qué tecnología seleccionar o qué nivel de inversión justificar. Por ello, la metodología se construyó progresivamente, comenzando por comprender la situación real del sistema, luego levantar datos, después modelar alternativas y finalmente evaluar escenarios de inversión.

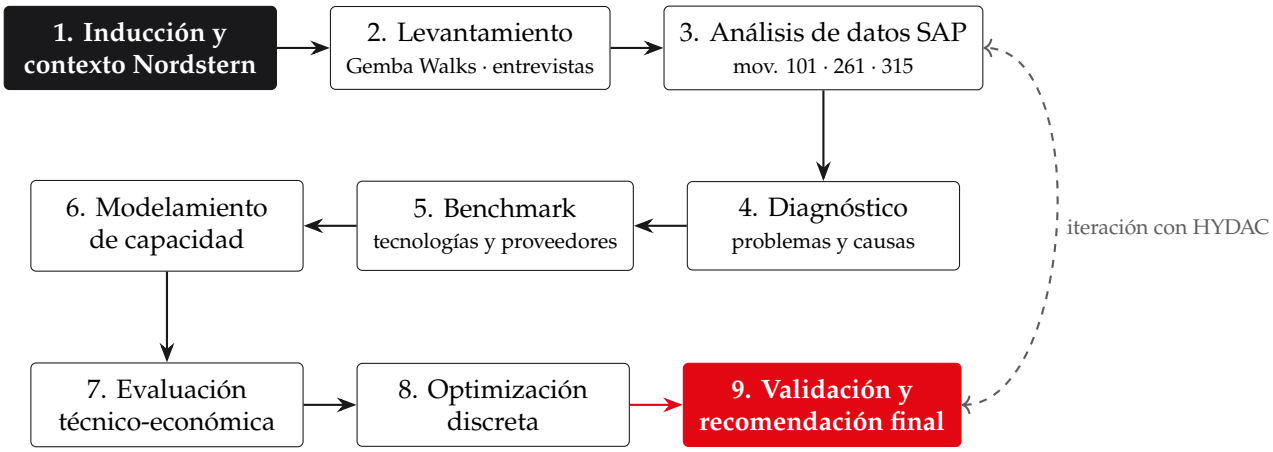


Figure 4.1: Metodología general del proyecto: nueve etapas secuenciales con iteración permanente junto al equipo de HYDAC.

El enfoque metodológico puede entenderse como una secuencia de ocho etapas principales. Primero, se realizó una inducción al contexto organizacional y estratégico de Werk

12. Segundo, se levantó información primaria mediante observación en terreno, entrevistas y recorridos por las áreas involucradas. Tercero, se obtuvo y procesó información SAP para caracterizar movimientos de inventario. Cuarto, se analizaron alternativas tecnológicas de almacenamiento automatizado. Quinto, se construyó un modelo de capacidad para comparar la demanda actual y futura con la capacidad de distintas configuraciones. Sexto, se desarrolló una evaluación técnico económica de los escenarios de inversión. Séptimo, se formuló un modelo de optimización discreta para determinar la configuración recomendada. Finalmente, se validaron los resultados con el equipo de HYDAC y se preparó una recomendación ejecutiva.

Esta metodología fue iterativa. Esto significa que las etapas no ocurrieron como bloques completamente separados, sino que muchas decisiones fueron ajustándose a medida que aparecía nueva información. Por ejemplo, el diagnóstico de terreno permitió entender mejor qué datos SAP eran necesarios, el análisis SAP permitió identificar los principales drivers de movimiento, el benchmark tecnológico permitió seleccionar parámetros técnicos relevantes, y el modelo financiero obligó a revisar supuestos de capacidad, mantenimiento y ahorro. Esta forma de trabajo fue especialmente importante porque el problema real de la planta no estaba completamente definido desde el inicio, sino que fue tomando forma a medida que se comprendía la operación.

4.2 Enfoque de investigación aplicada

La memoria utiliza un enfoque de investigación aplicada, porque busca resolver un problema concreto de una organización industrial mediante herramientas de análisis operacional, modelamiento, evaluación económica y optimización. A diferencia de una investigación puramente conceptual, el trabajo se apoya en datos reales de la empresa, observaciones directas de planta, información técnica de proveedores, parámetros económicos internos y retroalimentación de actores involucrados en la operación.

Desde el punto de vista académico, el enfoque aplicado permite conectar teoría y práctica. Conceptos como intralogística, automatización de almacenamiento, SAP EWM, capacity modelling, evaluación de inversiones y optimización discreta se utilizan no como contenidos aislados, sino como herramientas para responder una pregunta concreta: qué estrategia de automatización permite mejorar la capacidad y eficiencia operacional de CX y FSA/FSK bajo las restricciones de Nordstern 2026.

Desde el punto de vista industrial, el enfoque aplicado exige que los resultados sean comprensibles y utilizables para la empresa. Por ello, los modelos desarrollados no se construyeron solamente para obtener una solución matemática, sino también para entregar una lógica de decisión que pudiera ser explicada a supervisores, equipos de logística, ingeniería, controlling y dirección. La recomendación debía ser técnicamente sólida, pero también clara y defendible en términos de negocio.

4.3 Etapas generales de la metodología

La metodología general se divide en las siguientes etapas:

1. Inducción y comprensión del contexto estratégico.
2. Levantamiento de información en terreno.
3. Análisis operacional del sistema actual.
4. Extracción, limpieza e interpretación de datos SAP.
5. Benchmark y evaluación de alternativas tecnológicas.
6. Modelamiento de capacidad.
7. Evaluación técnico económica de escenarios.
8. Formulación del modelo de optimización discreta.
9. Validación de resultados y construcción de la recomendación final.

Cada etapa responde a una necesidad distinta dentro del proyecto. La inducción permitió entender el marco Nordstern 2026. El levantamiento de información permitió reconstruir una situación inicial que no estaba completamente consolidada. El análisis SAP permitió transformar la operación en datos objetivos. El benchmark permitió comparar alternativas. El modelo de capacidad permitió traducir los requerimientos de almacenamiento en escenarios cuantitativos. La evaluación económica permitió estimar el valor financiero de cada alternativa. La optimización permitió seleccionar el número recomendado de módulos. La validación permitió asegurar que los resultados fueran consistentes con la realidad de HYDAC.

4.4 Inducción y comprensión del contexto estratégico

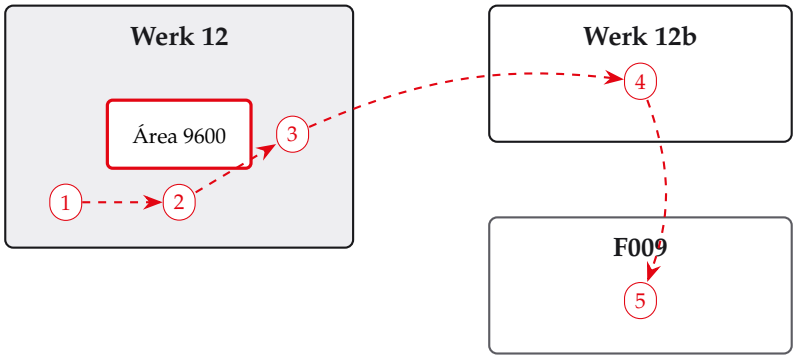
La primera etapa de la metodología consistió en comprender el contexto general del proyecto dentro de HYDAC Werk 12. Durante esta fase se realizó la presentación del equipo de trabajo, la introducción al problema por parte de la empresa, el reconocimiento inicial de las instalaciones y la comprensión del plan Nordstern 2026. Esta etapa fue fundamental porque permitió identificar que el proyecto no trataba solamente de resolver un problema de espacio, sino de contribuir a una transformación logística más amplia.

En esta fase se identificaron tres pilares principales asociados a la visión futura de la planta: consolidación de CX, integración con SAP EWM y aumento de densidad de almacenamiento. Estos pilares fueron utilizados como marco de referencia para evaluar posteriormente si una alternativa era coherente con la estrategia de la organización. Por ejemplo, una solución podía entregar capacidad adicional, pero si no permitía integrarse con SAP EWM o no contribuía a reducir la dependencia de F009, no podía considerarse completamente alineada con Nordstern 2026.

La inducción también permitió comprender que la información disponible al inicio era parcial. HYDAC contaba con conocimiento interno, datos preliminares y una visión estratégica clara, pero no existía todavía un diagnóstico completo que integrara capacidad, movimientos SAP, flujos físicos, layout, costos y escenarios de inversión. Por esta razón, la metodología debía comenzar necesariamente con un levantamiento amplio de información.

4.5 Levantamiento de información en terreno

La segunda etapa consistió en levantar información primaria directamente en la planta. Para esto se realizaron recorridos estructurados, conocidos como Gemba Walks, donde Gemba puede entenderse como "el lugar real" donde ocurre el trabajo. Estos recorridos permitieron observar físicamente las zonas Werk 12, Werk 12b y F009, identificar flujos de materiales, condiciones actuales de almacenamiento, puntos de congestión, distancias de desplazamiento y dependencia de áreas auxiliares.



1: recepción y flujos de entrada 2: área 9600 y estaciones de picking 3: racks manuales
4: almacenamiento CX en Werk 12b 5: almacén auxiliar F009 y zonas de overflow

Figure 4.2: Recorrido realizado durante el levantamiento en planta (Gemba Walks), cubriendo las tres zonas logísticas del análisis.

El levantamiento en terreno fue necesario porque los datos de sistema por sí solos no muestran completamente cómo opera una planta. SAP puede indicar que un material se movió, pero no siempre revela la dificultad física del movimiento, el recorrido realizado por el operador, el nivel de congestión en un pasillo o las condiciones ergonómicas del picking. Por esta razón, las observaciones directas complementaron el análisis cuantitativo y permitieron interpretar mejor los movimientos identificados posteriormente en SAP.

Además de los recorridos, se realizaron entrevistas semiestructuradas con operadores, supervisores y personal de logística. Estas entrevistas permitieron recoger conocimiento práctico sobre problemas de la operación diaria, zonas críticas, dificultades para encontrar materiales, dependencia de F009, restricciones de espacio y percepción del personal sobre posibles mejoras. Esta información no fue utilizada como evidencia aislada, sino como complemento para orientar el análisis de datos y validar los hallazgos del diagnóstico.

4.6 Construcción y análisis del layout

Una actividad relevante dentro del levantamiento fue la construcción y revisión de planos o representaciones del sistema físico. Al inicio del proyecto no se contaba con todos los planos consolidados necesarios para analizar la configuración logística completa, por lo que fue necesario reconstruir información de layout, identificar zonas relevantes y representar la relación entre Werk 12, Werk 12b, área 9600 y F009.

El layout permitió visualizar el problema desde una perspectiva espacial. Esta representación fue clave para entender la dispersión de materiales, la ubicación relativa de los

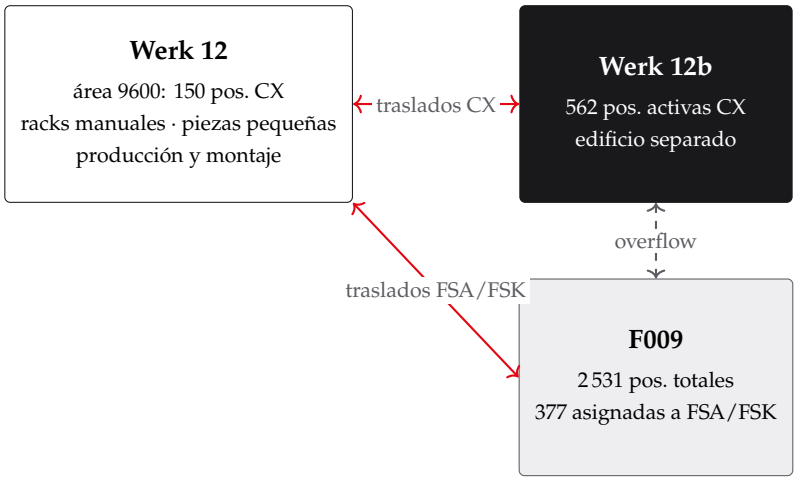


Figure 4.3: Representación As Is del sistema físico levantado durante la metodología: tres zonas separadas con intercambio permanente de materiales.

almacenes, las distancias potenciales de desplazamiento y las restricciones físicas para instalar equipos automatizados. En decisiones de automatización, el layout es tan importante como la capacidad, porque una solución técnicamente atractiva puede no ser viable si no cabe físicamente, si interfiere con flujos existentes o si no se ubica cerca de los puntos de consumo.

El análisis de layout también permitió conectar la propuesta de VLM con la posterior evaluación de transporte interno mediante AMR. Si los módulos verticales concentran materiales dentro de Werk 12, entonces se vuelve necesario estudiar cómo esos materiales se moverán hacia estaciones de trabajo y cómo retornarán cajas vacías. Por ello, la metodología no separó completamente almacenamiento y transporte, sino que los entendió como componentes de una misma arquitectura intralogística.

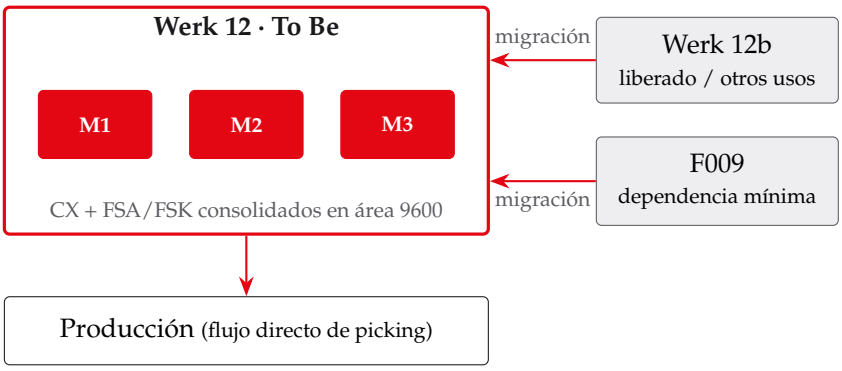


Figure 4.4: Concepto To Be preliminar construido durante la metodología: consolidación en Werk 12 mediante módulos verticales y migración de materiales desde Werk 12b y F009.

4.7 Fuentes de información

El proyecto utilizó distintas fuentes de información, las cuales se pueden clasificar en fuentes primarias, fuentes secundarias, datos de sistema y documentación técnica.

4.7.a Fuentes primarias

Las fuentes primarias corresponden a información levantada directamente durante el desarrollo del proyecto. Incluyen observaciones en terreno, recorridos por planta, entrevistas con operadores, conversaciones con supervisores de logística, mediciones de espacio disponible, fotografías de zonas de almacenamiento y registros generados por el equipo de trabajo. Estas fuentes fueron fundamentales para comprender la operación desde una perspectiva práctica.

4.7.b Datos SAP

Los datos SAP constituyen una de las fuentes cuantitativas más importantes de la memoria. Se utilizaron movimientos de inventario asociados principalmente a los tipos 101, 261 y 315 para analizar recepción de materiales, consumo hacia producción y relocalizaciones internas. Esta información permitió caracterizar la carga operacional de CX y FSA/FSK, identificar patrones de picking y cuantificar el nivel de actividad asociado a las distintas zonas de almacenamiento.

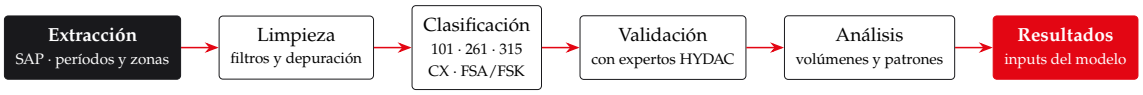


Figure 4.5: Pipeline de tratamiento de los datos SAP: desde la extracción hasta los resultados que alimentan el modelamiento de capacidad y la evaluación económica.

4.7.c Documentación técnica de proveedores

También se utilizaron documentos técnicos y comunicaciones con proveedores de soluciones de almacenamiento automatizado. En particular, se revisó información de Modula, Kardex, Hänel y SSI Schäfer, considerando dimensiones, capacidad, compatibilidad con SAP EWM, restricciones de instalación, carga por bandeja, ergonomía y características operacionales. Para el caso Modula ML50D, se profundizó en la configuración técnica validada por proveedor, la cual fue utilizada como base para el modelo de capacidad.

4.7.d Parámetros económicos internos

Los parámetros económicos internos provinieron de información entregada o validada por HYDAC, incluyendo costos por posición, costos de relocalización, costos asociados a recepción de materiales, ahorros estimados, inversión por equipo, costos de mantenimiento y supuestos utilizados para la evaluación financiera. Estos datos permitieron construir un modelo económico coherente con la realidad de la empresa.

4.8 Análisis operacional del sistema actual

El análisis operacional tuvo como objetivo caracterizar la situación As Is del sistema de almacenamiento. Para ello se estudiaron las áreas involucradas, la distribución de materiales, los flujos físicos observados y los principales problemas de operación. El análisis se concentró en identificar las causas que generaban ineficiencias, no solo sus síntomas.

Entre los principales elementos analizados se encuentran la dispersión de inventario, la dependencia de F009, las distancias de desplazamiento, la existencia de relocalizaciones internas, la disponibilidad limitada de posiciones para CX en el área 9600, la distribución de FSA/FSK dentro de F009 y la relación entre almacenamiento y consumo hacia producción. Estos elementos permitieron construir una visión completa del problema.

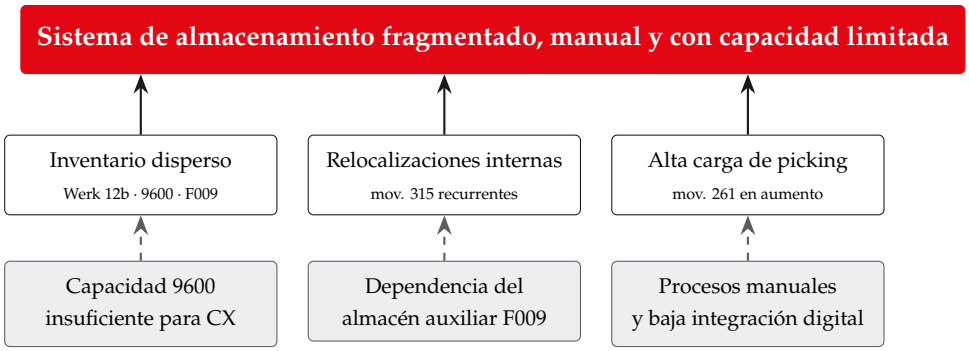


Figure 4.6: Árbol de problemas del sistema actual construido durante la etapa de diagnóstico metodológico.

La lógica del análisis operacional fue conectar observaciones cualitativas con datos cuantitativos. Por ejemplo, la percepción de que existían muchos movimientos internos se contrastó posteriormente con los movimientos SAP 315. La percepción de alta carga de picking se contrastó con los movimientos 261. La percepción de falta de capacidad se contrastó con las posiciones disponibles en Werk 12b, área 9600 y F009. Esta triangulación permitió fortalecer el diagnóstico.

4.9 Análisis de datos SAP

El análisis de datos SAP se desarrolló para obtener una base objetiva sobre el comportamiento de los materiales CX y FSA/FSK. La metodología incluyó solicitud de acceso a información, comprensión de los tipos de movimiento, limpieza de datos, clasificación por zonas, análisis por período y construcción de tablas resumen. Los movimientos principales estudiados fueron 101, 261 y 315.

El movimiento 101 fue utilizado para representar entradas de material. El movimiento 261 fue utilizado para representar consumo hacia producción, siendo uno de los indicadores más relevantes para medir carga de picking. El movimiento 315 fue utilizado para representar relocalizaciones internas, las cuales permiten observar el nivel de reorganización y dispersión dentro del sistema. Esta selección de movimientos permitió cubrir los principales procesos asociados al almacenamiento: entrada, salida hacia producción y movimiento interno.

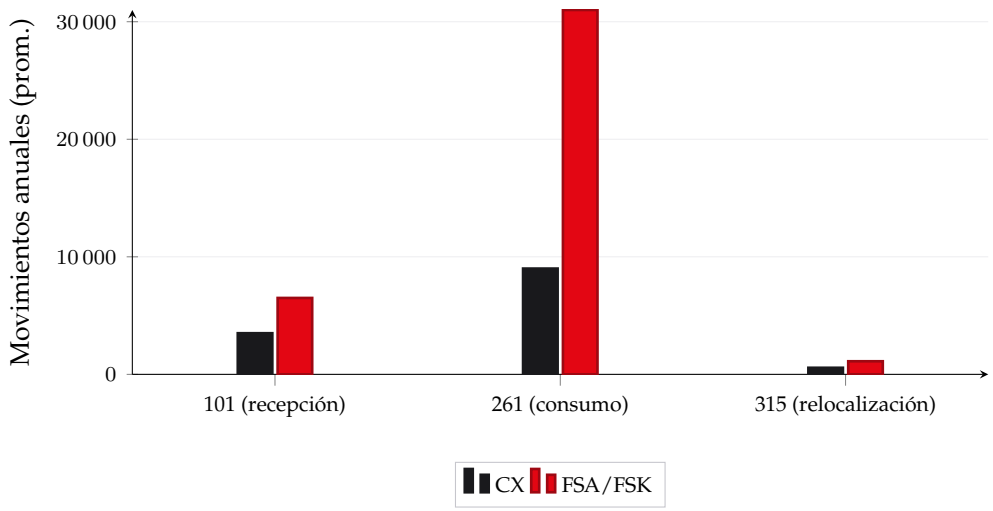


Figure 4.7: Volumen anual promedio de movimientos SAP por tipo para CX y FSA/FSK: el consumo hacia producción (261) domina la carga operacional del sistema.

El proceso de análisis SAP no consistió únicamente en descargar datos y graficarlos. Fue necesario aprender cómo funcionaba la estructura de SAP en HYDAC, validar filtros con colegas de Werk 12, interpretar correctamente las ubicaciones y asegurar que los movimientos utilizados correspondieran al fenómeno operacional que se buscaba estudiar. Esta validación fue importante porque un error en la interpretación de un tipo de movimiento podría llevar a conclusiones incorrectas sobre capacidad, picking o relocalización.

El resultado de esta etapa fue una caracterización cuantitativa de la operación. Se identificaron patrones relevantes, como la alta importancia del movimiento 261 para FSA/FSK y CX, la presencia de movimientos 315 asociados a relocalizaciones internas y la necesidad de considerar tanto el volumen de posiciones como la frecuencia de movimientos. Esta información fue posteriormente utilizada en el diagnóstico, el modelo de capacidad y la justificación económica.

4.10 Benchmark de alternativas tecnológicas

Luego de comprender la situación actual, se realizó un benchmark de alternativas tecnológicas de almacenamiento automatizado. El objetivo de esta etapa fue comparar distintas opciones disponibles en el mercado y evaluar cuál se ajustaba mejor a las restricciones de Werk 12, los requerimientos de capacidad, la integración con SAP EWM y la estrategia Nordstern 2026.

Las alternativas consideradas incluyeron racks tradicionales, expansión mediante nuevos almacenes, sistemas VLM, shuttle systems, AS/RS y proveedores específicos como Modula, Kardex, Hänel y SSI Schäfer. Esta etapa fue relevante porque permitió evitar una decisión prematura. Antes de recomendar Modula ML50D, fue necesario comparar distintas posibilidades y entender sus ventajas, limitaciones y nivel de ajuste al problema.

Los criterios utilizados para comparar alternativas incluyeron capacidad de almacenamiento, footprint, altura requerida, velocidad de picking, ergonomía, carga máxima, integración con SAP EWM, flexibilidad ante distintos tamaños de KLT, disponibilidad de soporte, costo aproximado y compatibilidad con el layout de Werk 12. En el caso de VLM,

se profundizó especialmente en la capacidad de almacenar KLT de 400 mm por 300 mm, la cantidad de bandejas disponibles, la carga por bandeja y la forma en que la solución podía contribuir a la consolidación de CX y FSA/FSK.

El resultado del benchmark fue la identificación del Modula ML50D como alternativa preferente para el análisis detallado. Esta selección se justificó por su ajuste técnico, capacidad de integración, densidad de almacenamiento, ergonomía y compatibilidad con los requerimientos de Nordstern 2026. Sin embargo, la selección técnica no cerraba todavía la decisión, ya que aún era necesario determinar cuántos módulos instalar y si la inversión era económicamente conveniente.

4.11 Modelamiento de capacidad

El modelamiento de capacidad tuvo como objetivo determinar si distintas configuraciones de módulos Modula ML50D podían absorber los requerimientos actuales y futuros de CX y FSA/FSK. Para ello se utilizó la capacidad validada del sistema, considerando 70 bandejas por lift y 24 posiciones KLT por bandeja, lo que entrega 1.680 posiciones KLT por unidad.



Figure 4.8: Cálculo de la capacidad por unidad Modula ML50D: 70 bandejas de 24 KLT entregan 1 680 posiciones nominales, equivalentes a 1 344 posiciones usables con tolerancia operacional de 20%.

La demanda base se construyó a partir del footprint actual de CX y FSA/FSK. Para CX se consideraron 562 posiciones en Werk 12b y 150 posiciones en el área 9600, lo que entrega un total de 712 posiciones. Para FSA/FSK se consideraron 377 posiciones asociadas a F009. En conjunto, el requerimiento base de consolidación fue de 1.089 posiciones. Luego se incorporaron escenarios de crecimiento asociados a Nordstern 2026, considerando rangos entre 15% y 25%.

El modelo comparó la capacidad nominal y la capacidad usable de las configuraciones de uno a cinco módulos. Además, se consideró una tolerancia operacional, ya que no es recomendable utilizar el 100% de la capacidad nominal en sistemas automatizados. Esta tolerancia permite mantener flexibilidad, absorber crecimiento, distribuir fast movers, evitar congestión y reducir riesgos de saturación.

Una de las decisiones metodológicas más importantes fue separar capacidad física de capacidad operacional. Si bien un módulo podía parecer suficiente desde el punto de vista de capacidad nominal, no necesariamente resolvía los problemas de picking, redundancia, distribución de materiales de alta rotación y crecimiento futuro. Por ello, el modelo de capacidad no se utilizó como una simple suma de posiciones, sino como una herramienta para evaluar factibilidad operacional.

4.12 Evaluación técnico económica

La evaluación técnico económica permitió estimar el impacto financiero de implementar módulos Modula ML50D. Esta etapa consideró tanto la inversión requerida como los ahorros anuales esperados. Los componentes de ahorro analizados fueron ahorro de personal, ahorro en inventario, liberación de superficie, reducción de relocalizaciones internas y reducción de posiciones redundantes.

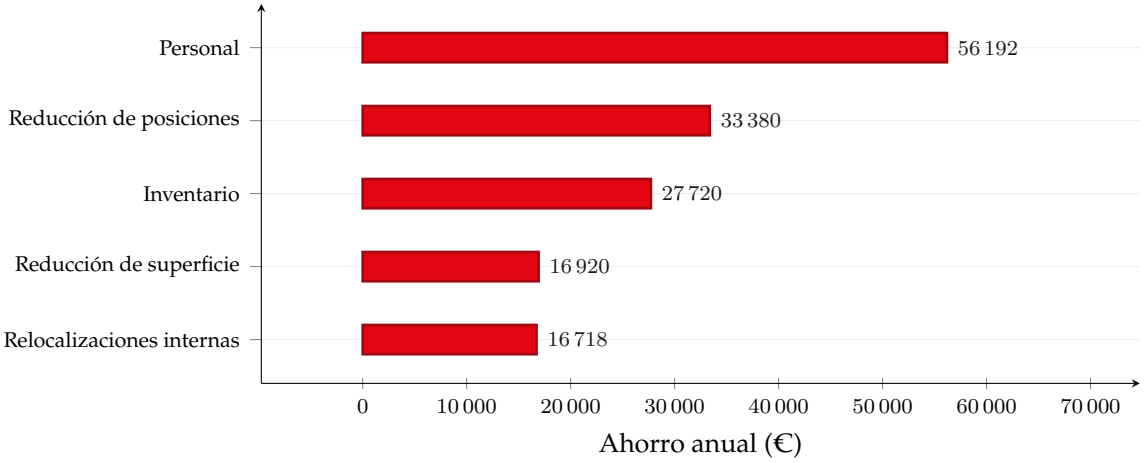


Figure 4.9: Distribución de los ahorros anuales estimados por categoría (total utilizado en el modelo: 150 738 €).

El cálculo de ahorros se construyó a partir de parámetros validados por HYDAC y correcciones realizadas durante el desarrollo del proyecto. En particular, se recalculó el potencial de ahorro anual para la primera unidad, llegando a un valor corregido de 150.738 euros por año. Este valor fue posteriormente utilizado como entrada para el modelo financiero y los escenarios de inversión.

La evaluación financiera consideró un horizonte de cinco años, una tasa de descuento de 8%, inversión por lift, costos de mantenimiento y flujos de ahorro ajustados mediante rendimientos decrecientes. Los indicadores utilizados fueron VAN, TIR, ROI y payback. Estos indicadores permitieron comparar los escenarios de uno a cinco módulos desde una perspectiva económica.

La evaluación técnico económica fue necesaria porque la decisión de automatizar no podía justificarse solamente con argumentos operacionales. La empresa necesitaba saber si la inversión generaba valor, cuánto tiempo demoraba en recuperarse, qué escenario maximizaba el VAN y qué ocurría cuando se agregaban unidades adicionales. Esta etapa permitió transformar la propuesta técnica en una decisión de inversión defendible.

4.13 Modelo de optimización discreta

La etapa de optimización tuvo como objetivo determinar el número recomendado de módulos Modula ML50D. Para ello se formuló un modelo de optimización discreta, donde la variable de decisión corresponde al número entero de módulos a instalar. El modelo compara escenarios desde cero hasta cinco unidades, incorporando inversión, ahorro anual, capacidad y rendimientos decrecientes.

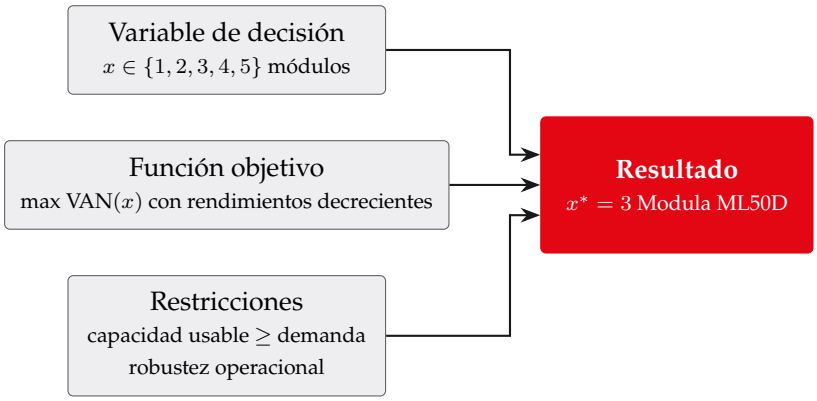


Figure 4.10: Esquema conceptual del modelo de optimización discreta utilizado en la metodología.

La función de ahorro se modeló considerando que cada módulo adicional genera un beneficio marginal menor. Esta lógica responde al principio de rendimientos decrecientes. El primer módulo captura los ahorros más evidentes, el segundo agrega beneficios relevantes, el tercero completa la configuración estratégica, y las unidades adicionales entregan principalmente holgura, redundancia o capacidad extra con menor impacto económico marginal.

El modelo permitió distinguir dos tipos de óptimo. Primero, un óptimo puramente financiero, donde se busca maximizar retorno sin imponer todas las restricciones operacionales. Segundo, un óptimo factible bajo restricciones reales, donde se exige capacidad suficiente, robustez operacional, eliminación o reducción de F009, distribución de fast movers y alineación con Nordstern 2026. Esta distinción es fundamental, porque una solución financieramente eficiente puede no ser suficiente para resolver el problema industrial completo.

El resultado metodológico más relevante fue que tres módulos Modula ML50D representan la configuración recomendada bajo restricciones reales de capacidad, operación y estrategia. Esta conclusión no proviene de una preferencia subjetiva, sino de la integración entre datos SAP, capacidad, evaluación económica, rendimientos decrecientes y restricciones operacionales.

4.14 Evaluación complementaria de AMR

Como complemento al análisis de almacenamiento automatizado, se evaluó la incorporación de robots móviles autónomos, conocidos como AMR, para apoyar el transporte interno entre los módulos y las estaciones de trabajo. Esta etapa se desarrolló como una extensión natural del concepto de automatización intralogística, ya que la consolidación de materiales en VLM genera la necesidad de diseñar flujos eficientes desde el sistema de almacenamiento hacia los puntos de consumo.

La evaluación de AMR consideró siete modelos candidatos: Pudu T150, Pudu T300, Geek+ M200C, Quicktron M30A(H), MiR250, OTTO 100 y ForwardX Flex 300. Los criterios de evaluación incluyeron seguridad, capacidad de scheduling, integración de sistemas, rendimiento, costo y costo total de propiedad. Se asignaron ponderaciones a cada criterio, priorizando seguridad y escalabilidad por sobre el precio inicial.

Además, se compararon dos esquemas de ruteo: ruta circular y entrega punto a punto.

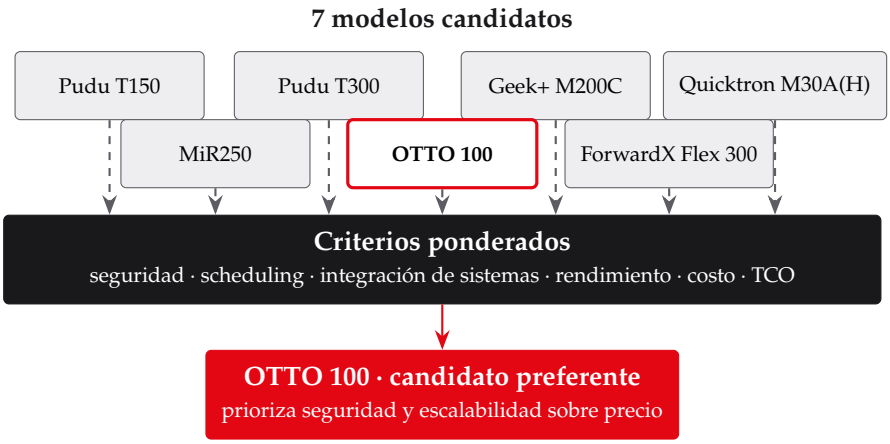


Figure 4.11: Evaluación complementaria de AMR: siete modelos comparados mediante criterios ponderados, priorizando seguridad y escalabilidad por sobre el costo inicial.

La ruta circular presenta ventajas para escenarios futuros con múltiples robots y demanda más regular, mientras que la entrega punto a punto resulta más adecuada para una etapa inicial con un solo robot y demanda dinámica. Esta evaluación permitió complementar la propuesta de almacenamiento automatizado con una visión más amplia del flujo interno de materiales.

4.15 Validación de resultados

La validación de resultados se realizó mediante reuniones, presentaciones parciales, revisión de supuestos, retroalimentación del equipo de HYDAC y ajustes sucesivos al informe técnico. Durante el proyecto, los resultados fueron compartidos con supervisores, equipos de logística, ingeniería y dirección, permitiendo corregir interpretaciones, ajustar parámetros y mejorar la claridad de la recomendación.

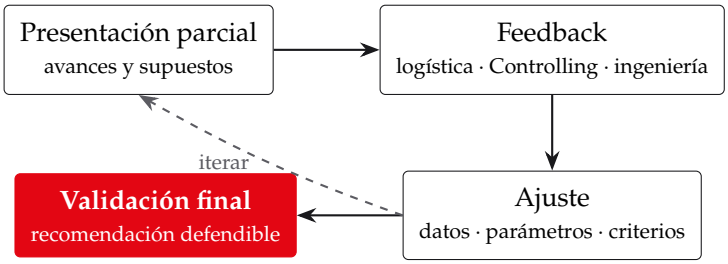


Figure 4.12: Ciclo de validación de resultados con el equipo de HYDAC: presentación parcial, retroalimentación, ajuste y validación final.

La validación fue importante por tres razones. Primero, permitió asegurar que los datos utilizados fueran coherentes con la realidad de la planta. Segundo, permitió que los modelos no quedaran desconectados de las restricciones prácticas de HYDAC. Tercero, permitió transformar resultados técnicos en argumentos comprensibles para una audiencia de gestión. Esto fue especialmente relevante en el modelo de optimización, donde fue necesario explicar de manera clara por qué tres módulos eran recomendables aunque uno o dos escenarios pudieran mostrar indicadores financieros muy altos.

El proceso de validación también permitió reforzar la conexión entre la recomendación

y Nordstern 2026. La solución final debía responder al crecimiento futuro, la integración SAP EWM, la consolidación de CX y FSA/FSK, la reducción de F009 y la modernización del sistema logístico. Por ello, el resultado final fue presentado no solo como una alternativa técnica, sino como una configuración estratégica de automatización para Werk12.

4.16 Síntesis metodológica

La metodología desarrollada permitió abordar un problema industrial complejo mediante una secuencia lógica de diagnóstico, análisis, modelamiento, evaluación y optimización. El proyecto comenzó con una necesidad abierta de HYDAC, asociada a capacidad, consolidación y crecimiento. Luego se levantó información en terreno, se analizaron datos SAP, se evaluaron alternativas tecnológicas, se modeló capacidad, se calcularon ahorros, se evaluaron escenarios financieros y se formuló un modelo de optimización discreta.

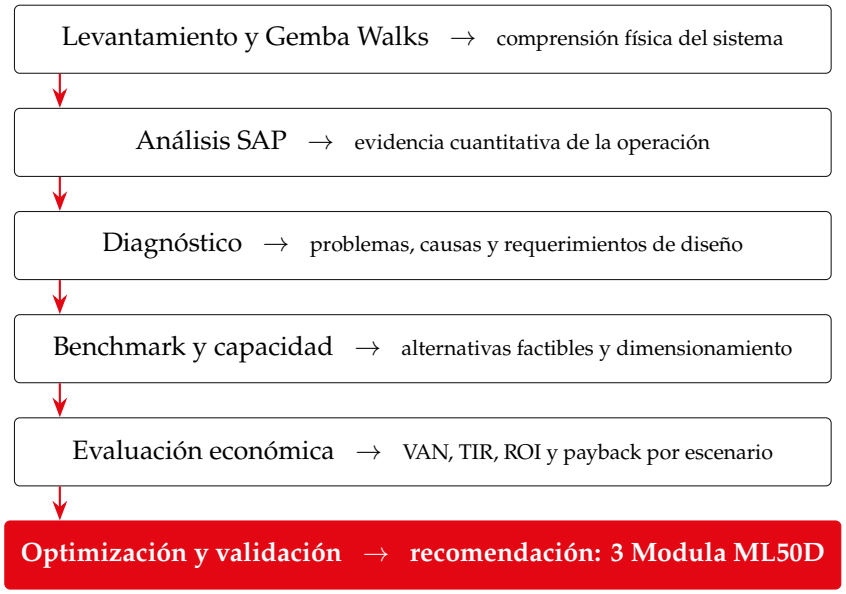


Figure 4.13: Síntesis metodológica: cada etapa entrega el insumo de la siguiente, desde el levantamiento en terreno hasta la recomendación final.

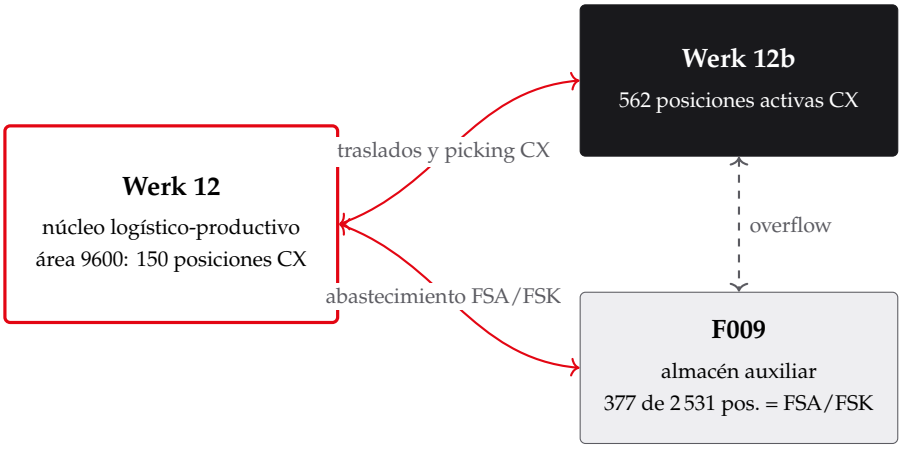
La principal fortaleza de esta metodología es que combina evidencia cualitativa y cuantitativa. Las observaciones en terreno permitieron entender la realidad de la operación. Los datos SAP permitieron cuantificar los movimientos. El benchmark permitió comparar soluciones. El modelo de capacidad permitió evaluar factibilidad. La evaluación económica permitió medir valor. La optimización permitió seleccionar una configuración. La validación con HYDAC permitió asegurar pertinencia industrial.

En consecuencia, la metodología no solo permitió responder cuántos módulos Modula ML50D instalar, sino también construir una lógica de decisión replicable para evaluar proyectos de automatización intralogística en entornos industriales. Esta lógica será aplicada en los capítulos siguientes, comenzando por el diagnóstico del sistema actual y el análisis detallado de las condiciones As Is de Werk 12, Werk 12b y F009.

5 Diagnóstico del Sistema Actual

5.1 Descripción general del sistema

El diagnóstico del sistema actual tiene como objetivo comprender la situación real de almacenamiento y flujo de materiales en HYDAC Werk 12 antes de proponer cualquier alternativa de automatización. Esta etapa fue fundamental porque el proyecto no comenzó con una solución cerrada, sino con una necesidad estratégica abierta, aumentar capacidad, consolidar materiales, reducir dependencia de almacenes auxiliares y preparar la operación para el crecimiento definido por Nordstern 2026. Por ello, antes de evaluar equipos, proveedores o modelos financieros, fue necesario observar la planta, reconstruir el sistema físico, revisar los datos disponibles y transformar información dispersa en una base clara de análisis.



Lectura del diagnóstico: la operación funciona, pero de forma fragmentada;
cada flecha representa recorridos, coordinación y relocalizaciones que no agregan valor.

Figure 5.1: Situación As Is del sistema de almacenamiento: tres áreas físicas separadas sostienen la operación de CX y FSA/FSK.

La situación inicial del sistema se caracterizaba por una operación distribuida entre distintas áreas. Werk 12 funcionaba como el núcleo principal de producción y almacenamiento, el área 9600 dentro de Werk 12 concentraba parte de los materiales relevantes, Werk 12b se utilizaba como zona importante para almacenamiento CX, y F009 operaba como almacén auxiliar para FSA/FSK y otros grupos de materiales. Esta distribución generaba una estructura logística fragmentada, donde los materiales no siempre estaban

cerca del punto de consumo, los operadores debían desplazarse entre zonas y la gestión de inventario dependía de una combinación entre información SAP, conocimiento operativo y organización física del almacén.

El diagnóstico se construyó combinando observación en terreno, entrevistas con operadores y supervisores, revisión de datos SAP, análisis de ubicaciones y validación con el equipo de HYDAC. Esta combinación fue necesaria porque el problema no podía entenderse solamente desde un archivo de datos ni únicamente desde una visita visual a la planta. Los datos permitieron cuantificar movimientos, posiciones y costos, mientras que el trabajo en terreno permitió entender cómo esos movimientos se vivían realmente en la operación diaria.

En términos generales, el sistema actual presentaba cuatro características principales. Primero, una capacidad limitada para consolidar CX dentro de Werk 12. Segundo, una alta dispersión de FSA/FSK, especialmente por su dependencia de F009. Tercero, un volumen relevante de movimientos SAP asociados a consumo hacia producción y relocalizaciones internas. Cuarto, una estructura todavía parcialmente manual, con oportunidades claras de digitalización, automatización y mejora ergonómica.

Table 5.1: Áreas logísticas consideradas en el diagnóstico

Área	Rol dentro del sistema actual	Relevancia para el proyecto
Werk 12	Planta principal y zona objetivo de consolidación	Área donde se busca instalar la solución automatizada y concentrar operaciones futuras
Werk 12b	Zona actual de almacenamiento CX	Representa capacidad fuera del núcleo principal que se busca consolidar hacia Werk 12
Área 9600	Zona de almacenamiento dentro de Werk 12	Punto relevante para CX y FSA/FSK, asociado a movimientos SAP y disponibilidad limitada para CX
F009	Almacén auxiliar y zona de overflow	Área con alta dispersión de materiales y dependencia operacional para FSA/FSK

5.2 Werk 12

Werk 12 corresponde al espacio central de análisis dentro del proyecto, ya que representa la planta donde HYDAC busca consolidar operaciones y avanzar hacia el concepto logístico futuro definido por Nordstern 2026. En esta memoria, Werk 12 se entiende como un sistema productivo y logístico, no solamente como un edificio físico. Esto significa que su análisis considera zonas de almacenamiento, flujos de materiales, movimientos SAP, restricciones de layout, interacción con producción y capacidad de integración futura con SAP EWM.

Desde el punto de vista de capacidad, Werk 12 contaba con una estructura compuesta por almacenamiento manual, almacenamiento automático y almacenamiento de

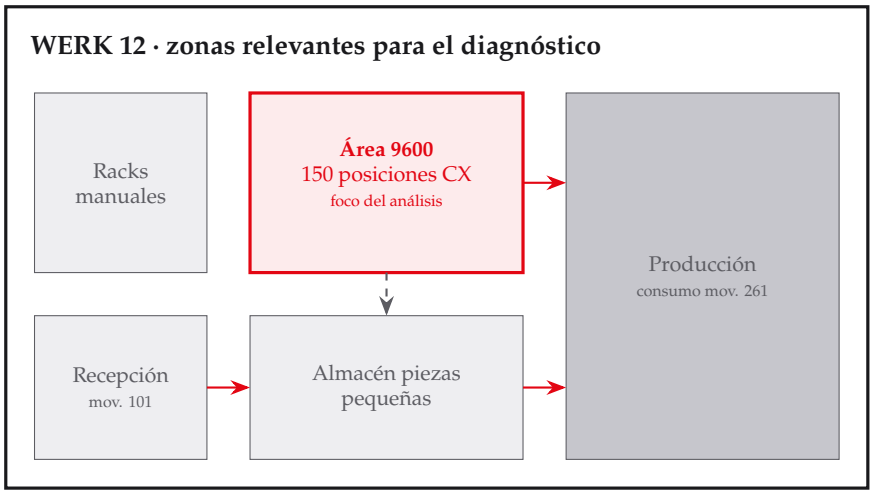


Figure 5.2: Layout conceptual de Werk 12 con las zonas relevantes marcadas; el área 9600 concentra el análisis de consolidación.

pequeñas piezas. Esta capacidad era relevante para la operación actual, pero no suficiente para resolver completamente los requerimientos de consolidación de CX y FSA/FSK bajo el escenario futuro. La existencia de almacenamiento automático dentro de Werk 12 mostraba que HYDAC ya tenía una base de automatización, pero también evidenciaba que esa capacidad no estaba diseñada para absorber completamente el crecimiento y la migración de los materiales foco del proyecto.

Table 5.2: Capacidad de almacenamiento actual en Werk 12

Tipo de almacenamiento	Número de posiciones
Almacenamiento manual	954
Almacenamiento automático	2,812
Pequeñas piezas	673
Total Werk 12	4,439

La tabla anterior permite observar que Werk 12 ya contaba con 4,439 posiciones de almacenamiento, pero esta cifra debe interpretarse con cuidado. Una parte de esas posiciones corresponde a capacidades existentes que no necesariamente están disponibles para CX o FSA/FSK, y otra parte responde a estructuras ya comprometidas con otros procesos o grupos de materiales. Por lo tanto, el problema no era solamente el número total de ubicaciones existentes, sino la capacidad realmente utilizable para consolidar las familias de materiales analizadas.

El área 9600 dentro de Werk 12 fue especialmente importante en el diagnóstico, porque allí se observó una capacidad disponible muy limitada para CX. En la situación inicial, solo 150 posiciones estaban disponibles para CX dentro de esta zona, lo cual contrastaba fuertemente con el objetivo estratégico de consolidación y crecimiento. Esta diferencia entre capacidad actual y capacidad requerida fue una de las primeras señales claras de que el sistema necesitaba una solución de mayor densidad.

Además, Werk 12 debía analizarse como el punto de convergencia futuro de los flujos. Si CX y FSA/FSK se consolidaban dentro de esta planta, entonces el sistema debía ser capaz de absorber no solamente las posiciones actuales, sino también los movimientos hacia producción, la separación de materiales de alta rotación, la integración con SAP

EWM y una operación más robusta frente al crecimiento. En ese sentido, Werk 12 no era simplemente el lugar donde se instalarían los módulos, sino el espacio donde debía construirse una nueva arquitectura intralogística.

5.3 Werk 12b

Werk 12b cumplía un rol relevante como zona de almacenamiento para CX. En el diagnóstico se identificó que CX contaba con 562 posiciones activas en esta área. Este dato fue fundamental porque mostraba que una parte importante de los materiales CX se encontraba físicamente separada del núcleo principal de Werk 12, lo que generaba una operación menos compacta y mayor necesidad de coordinación entre áreas.

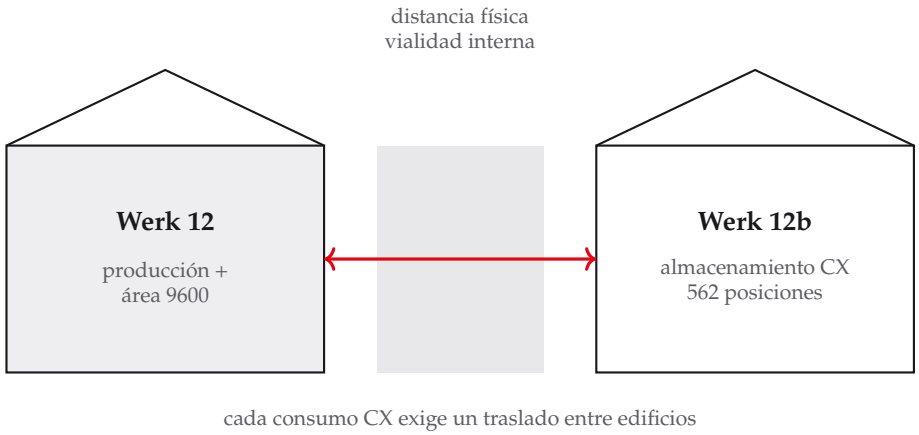


Figure 5.3: Separación física entre Werk 12 y Werk 12b: la distancia entre edificios convierte cada abastecimiento CX en un traslado interno con tiempo y costo asociado.

Desde el punto de vista operativo, Werk 12b funcionaba como una solución existente para sostener la operación, pero no como el estado futuro deseado por Nordstern 2026. Mantener CX en Werk 12b implicaba conservar una estructura distribuida, con menor densidad, mayor distancia respecto de los flujos principales y menor facilidad para implementar una lógica completamente digital e integrada. Por lo tanto, la consolidación de CX hacia Werk 12 se convirtió en uno de los puntos centrales del diagnóstico.

El hecho de que CX utilizara 562 posiciones en Werk 12b y solo contara con 150 posiciones disponibles en el área 9600 revelaba una brecha clara. Si el objetivo era llevar CX bajo un concepto más centralizado dentro de Werk 12, entonces la capacidad disponible actual no era suficiente. Esta brecha no podía resolverse simplemente reorganizando algunas ubicaciones, porque el crecimiento esperado y la necesidad de integrar el sistema con SAP EWM exigían una solución más robusta.

Table 5.3: Capacidad actual asociada a CX

Ubicación	Posiciones asociadas a CX
Werk 12b	562
Área 9600 en Werk 12	150
Footprint actual CX	712

El footprint actual de CX se estimó en 712 posiciones, considerando las 562 posiciones de Werk 12b y las 150 posiciones del área 9600. Este valor fue utilizado posteriormente

como parte del modelo de capacidad. Sin embargo, desde el diagnóstico ya era posible observar que este número no representaba solo una cantidad de posiciones, sino una señal de fragmentación. CX no estaba concentrado en un único sistema de almacenamiento, y esta condición generaba mayor complejidad para los flujos de abastecimiento, inventario y planificación futura.

5.4 F009

F009 corresponde a un almacén auxiliar que cumplía un rol de apoyo dentro del sistema actual. En el diagnóstico se identificó que esta área contaba con 2,531 posiciones de almacenamiento, de las cuales 377 estaban asignadas a FSA/FSK. Esto significa que FSA/FSK utilizaba aproximadamente el 14,9% de las posiciones de F009, mientras que el resto era ocupado por otros materiales o grupos de productos.

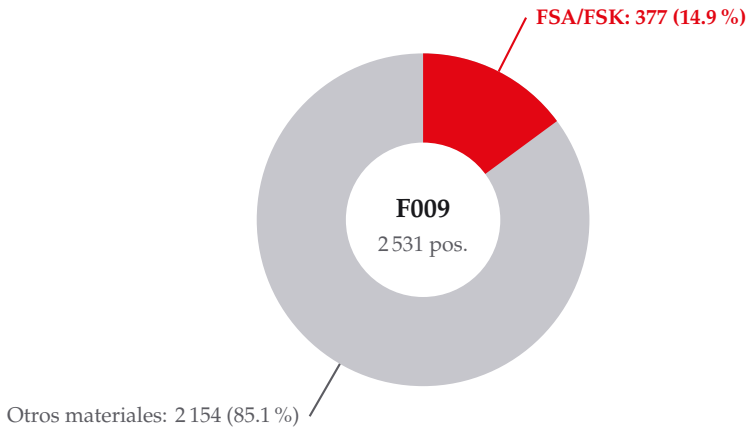


Figure 5.4: Ocupación del almacén auxiliar F009: FSA/FSK utiliza 377 de las 2 531 posiciones totales, evidenciando dispersión del inventario en un área no orientada a los materiales foco.

Table 5.4: Utilización de F009 por FSA/FSK

Concepto	Posiciones
Posiciones totales en F009	2,531
Posiciones asignadas a FSA/FSK	377
Participación aproximada de FSA/FSK	14,9%

La baja participación de FSA/FSK dentro de F009 no significaba que este grupo fuera poco relevante. Al contrario, el análisis posterior de movimientos SAP mostró que FSA/FSK generaba un volumen muy alto de consumo hacia producción y relocalizaciones internas. Esta combinación, pocas posiciones dedicadas y alta actividad operacional, permitió identificar una situación especialmente ineficiente, ya que materiales relevantes para producción se encontraban dispersos dentro de un almacén auxiliar compartido con otros grupos.

F009 actuaba como una zona de overflow, es decir, como un espacio de apoyo cuando el sistema principal no lograba absorber completamente los requerimientos. Este tipo de solución puede ser útil en el corto plazo, pero genera complejidad cuando se transforma en una dependencia estructural. En el caso estudiado, F009 aumentaba la necesidad de

movimientos internos, dificultaba la consolidación de materiales, generaba mayor distancia respecto de las zonas principales de consumo y reducía la transparencia operacional.

Desde el punto de vista del diagnóstico, F009 representaba uno de los principales argumentos para justificar una solución automatizada. La posibilidad de trasladar materiales relevantes de F009 hacia un sistema compacto dentro de Werk 12 permitiría reducir relocalizaciones internas, mejorar trazabilidad y disminuir la dependencia de un almacén auxiliar. Por esta razón, el objetivo no era solamente liberar posiciones, sino reducir una fuente estructural de complejidad.

5.5 Flujo de materiales

El flujo de materiales fue analizado considerando tres tipos principales de movimientos SAP: 101, 261 y 315. Estos movimientos permiten representar procesos distintos dentro del sistema. El movimiento 101 corresponde a la recepción de materiales, el movimiento 261 corresponde al consumo hacia producción y el movimiento 315 corresponde a relocalizaciones internas entre ubicaciones. Esta clasificación fue clave para entender no solo dónde estaban almacenados los materiales, sino también cómo se movían dentro de la operación.

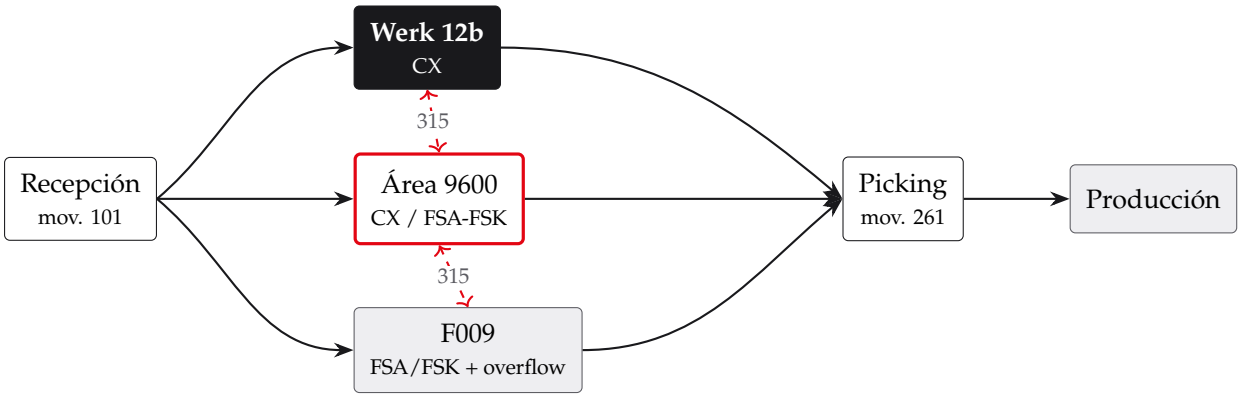


Figure 5.5: Diagrama de flujo de materiales As Is: la recepción alimenta tres zonas distintas y las relocalizaciones internas (mov. 315) conectan permanentemente los almacenes entre sí.

El movimiento 101 representa la entrada de material al sistema. Aunque es importante para asegurar disponibilidad de stock, no fue el principal driver de carga operacional en el proyecto. El movimiento 261, en cambio, fue uno de los más relevantes, porque refleja el consumo de materiales hacia producción. Un alto volumen de movimientos 261 implica que el sistema debe responder frecuentemente a requerimientos productivos, por lo que la ubicación de los materiales, el tiempo de picking y la facilidad de acceso se vuelven factores críticos.

El movimiento 315 fue relevante porque representa relocalizaciones internas. Estos movimientos no necesariamente agregan valor directo al producto final, pero consumen tiempo, recursos y capacidad operacional. Una alta cantidad de movimientos 315 puede indicar que el sistema actual requiere reorganizar stock con frecuencia, que los materiales no están ubicados de forma óptima o que existe dependencia de zonas auxiliares. En este sentido, reducir movimientos 315 es una oportunidad clara de mejora intralogística.

Durante el diagnóstico se observó que los movimientos 261 eran especialmente importantes para FSA/FSK y CX. En particular, FSA/FSK presentaba un promedio anual

Table 5.5: Movimientos SAP considerados en el diagnóstico

Movimiento SAP	Interpretación operacional	Relevancia para el diagnóstico
101	Recepción de materiales	Permite observar entradas y carga inicial del almacén
261	Consumo hacia producción	Representa el principal flujo de picking para abastecer procesos productivos
315	Relocalización interna	Permite identificar reorganización, dispersión y movimientos sin valor directo

superior a 31,000 movimientos 261, lo que lo convertía en uno de los principales drivers de picking. CX también presentaba una carga relevante de movimientos 261, con un promedio anual cercano a 9,500 movimientos. Esta diferencia permitió comprender que FSA/FSK tenía un peso operacional muy importante, incluso si su footprint físico en F009 parecía relativamente bajo.

5.6 Análisis de procesos

El análisis de procesos permitió conectar los datos de almacenamiento con la operación diaria. A partir del levantamiento en terreno y el análisis SAP, se identificaron cuatro procesos principales: recepción de materiales, almacenamiento o put away, picking hacia producción y relocalización interna. Cada uno de estos procesos presentaba oportunidades de mejora, pero el mayor impacto se concentraba en picking y relocalización, debido a la frecuencia de movimientos y a la dispersión física de los materiales.

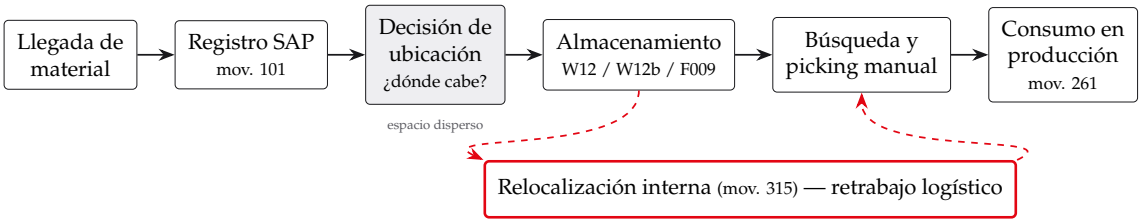


Figure 5.6: Mapa de proceso As Is: la decisión de ubicación sobre un espacio disperso genera relocalizaciones internas que se insertan como retrabajo dentro del flujo normal.

La recepción de materiales se relaciona con el movimiento 101. En esta etapa, el material ingresa al sistema y debe ser registrado, ubicado y almacenado. En un sistema con ubicaciones dispersas, la recepción puede requerir decisiones adicionales sobre dónde colocar el material, especialmente si las posiciones disponibles no están concentradas o si existen restricciones de espacio. Esta condición puede generar movimientos posteriores de reorganización.

El almacenamiento o put away corresponde al proceso de ubicar físicamente el material en una posición disponible. En el sistema actual, este proceso dependía de la estructura existente de ubicaciones y de la disponibilidad en las distintas áreas. Cuando los materiales se distribuyen entre Werk 12b, área 9600 y F009, el put away puede transformarse en una decisión más compleja, porque la ubicación seleccionada afecta recorridos futuros,

facilidad de picking y necesidad de relocalización.

El picking hacia producción, asociado principalmente al movimiento 261, representa uno de los procesos más críticos. En un entorno productivo, la disponibilidad de material afecta directamente la continuidad de la operación. Por ello, si los materiales de alta rotación se encuentran lejos, dispersos o en ubicaciones manuales poco ergonómicas, el sistema acumula tiempos de búsqueda, desplazamiento y manipulación. Esta situación se vuelve más crítica cuando el volumen de movimientos es alto, como ocurre especialmente en FSA/FSK.

Las relocalizaciones internas, asociadas al movimiento 315, representan una señal importante de ineficiencia. No toda relocalización es necesariamente negativa, pero un volumen elevado puede indicar que el sistema está compensando problemas de ubicación, saturación o dispersión. En el caso de HYDAC Werk 12, las relocalizaciones fueron consideradas como uno de los síntomas más claros de que la estructura actual debía consolidarse y simplificarse.

5.7 Problemas identificados

A partir del diagnóstico se identificaron distintos problemas operacionales. Estos problemas no se presentan como eventos aislados, sino como elementos conectados dentro de una misma estructura logística. La dispersión de materiales genera mayores recorridos, los recorridos aumentan tiempos de picking, la falta de capacidad impulsa el uso de F009, el uso de F009 aumenta relocalizaciones, y las relocalizaciones elevan el costo y la complejidad operacional. Por ello, el diagnóstico debe entenderse como una red de causas y efectos.

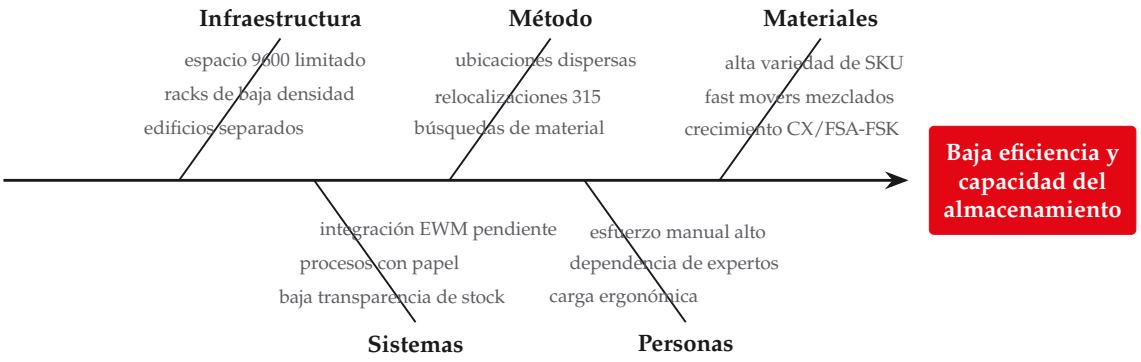


Figure 5.7: Diagrama causa-efecto de los problemas identificados en el diagnóstico del sistema de almacenamiento actual.

5.7.a Dispersión del inventario

El primer problema identificado fue la dispersión del inventario. CX se encontraba distribuido entre Werk 12b y el área 9600, mientras que FSA/FSK dependía parcialmente de F009 y otras zonas. Esta dispersión dificultaba la estandarización de procesos y aumentaba la necesidad de que los operadores se desplazaran o coordinaran movimientos entre áreas. Además, reducía la transparencia operacional, porque una misma familia de materiales podía no estar concentrada en un único concepto logístico.

5.7.b Capacidad limitada para CX en Werk 12

El segundo problema fue la capacidad limitada para CX dentro de Werk 12. Aunque CX tenía 562 posiciones activas en Werk 12b, solo existían 150 posiciones disponibles dentro del área 9600. Esto generaba una brecha directa frente al objetivo de consolidación. Si HYDAC quería mover CX hacia un concepto más centralizado en Werk 12, la capacidad actual no era suficiente y requería una solución de mayor densidad.

5.7.c Dependencia de F009

El tercer problema fue la dependencia de F009 como almacén auxiliar. F009 permitía absorber parte de la operación, pero a costa de aumentar complejidad. La dependencia de esta área implicaba más movimientos internos, menor cercanía con los puntos de consumo, mayor dificultad para controlar la dispersión y una operación menos compatible con el concepto futuro de Nordstern 2026. En términos estratégicos, F009 funcionaba como una solución de apoyo, pero no como un diseño óptimo de largo plazo.

5.7.d Alto volumen de movimientos 261

El movimiento 261, asociado al consumo hacia producción, mostró una carga operacional especialmente relevante. FSA/FSK superaba los 31,000 movimientos anuales promedio, mientras que CX también presentaba una actividad significativa. Este volumen confirmó que la solución futura no podía evaluarse solo en términos de capacidad física, sino también de rendimiento operacional. Si una tecnología no era capaz de sostener alta frecuencia de picking, entonces no sería adecuada aunque tuviera suficiente capacidad nominal.

5.7.e Relocalizaciones internas

Las relocalizaciones internas, representadas por movimientos 315, fueron identificadas como otra fuente relevante de ineficiencia. Estos movimientos reflejan reorganización de inventario, traslados entre ubicaciones y esfuerzos internos que consumen recursos sin entregar valor directo al cliente. La presencia de relocalizaciones en CX y FSA/FSK reforzó la necesidad de consolidar materiales en ubicaciones más compactas y controladas.

5.7.f Distancias de desplazamiento y tiempos no productivos

La distribución entre Werk 12, Werk 12b y F009 generaba distancias de desplazamiento y tiempos no productivos para los operadores. En logística industrial, caminar, buscar, trasladar y reorganizar son actividades necesarias en algunos casos, pero cuando aumentan excesivamente, se transforman en desperdicios operacionales. En este caso, la dispersión física del sistema aumentaba la probabilidad de recorridos largos y tiempos de espera.

5.7.g Riesgos ergonómicos

El uso de almacenamiento manual y racks tradicionales puede implicar agacharse, estirarse, levantar materiales en posiciones incómodas o realizar movimientos repetitivos. En una operación con alto volumen de picking, estas condiciones pueden generar riesgos

ergonómicos y afectar la productividad. Por ello, la ergonomía fue considerada como un criterio importante dentro de la evaluación de soluciones automatizadas.

5.7.h Limitada integración digital

Si bien SAP se utilizaba para registrar movimientos, la operación física todavía no estaba completamente alineada con un concepto SAP EWM futuro. La existencia de procesos manuales, ubicaciones dispersas y estructuras no totalmente estandarizadas dificultaba avanzar hacia una logística más digital, trazable y sin papel. Este punto era especialmente relevante dentro de Nordstern 2026, ya que la integración digital era uno de los pilares estratégicos del programa.

Table 5.6: Principales problemas identificados en el sistema actual

Problema	Evidencia observada	Impacto principal
Dispersión de inventario	Materiales distribuidos entre Werk 12b, área 9600 y F009	Mayor complejidad y menor transparencia
Capacidad limitada para CX	Solo 150 posiciones disponibles en área 9600	Dificultad para consolidar CX dentro de Werk 12
Dependencia de F009	F009 utilizado como almacén auxiliar y overflow	Más relocalizaciones y transporte interno
Alto volumen de movimientos 261	Consumo frecuente hacia producción en CX y FSA/FSK	Mayor carga de picking
Relocalizaciones internas 315	Movimientos entre ubicaciones y reorganización de stock	Tiempo no productivo y costo logístico
Riesgos ergonómicos	Picking manual y recorridos físicos	Mayor esfuerzo para operadores
Limitada integración digital	Operación física no completamente alineada con SAP EWM	Menor trazabilidad y menor preparación futura

5.8 Oportunidades de mejora

A partir de los problemas identificados, se definieron oportunidades de mejora asociadas a consolidación, automatización, digitalización, reducción de movimientos internos y modernización del flujo intralogístico. Estas oportunidades no fueron tratadas como ideas independientes, sino como condiciones necesarias para construir una solución coherente con Nordstern 2026.

5.8.a Consolidación de CX y FSA/FSK

La primera oportunidad consiste en consolidar CX y FSA/FSK dentro de Werk 12. Esto permitiría reducir la dispersión actual, simplificar la gestión del inventario y disminuir la dependencia de Werk 12b y F009. La consolidación también facilitaría una estructura más compatible con SAP EWM, al concentrar materiales en ubicaciones más controladas y estandarizadas.



Figure 5.8: Oportunidades de mejora identificadas en el diagnóstico y su convergencia hacia el objetivo estratégico.

5.8.b Reducción de dependencia de F009

La segunda oportunidad consiste en reducir o eliminar la dependencia de F009 para los materiales foco del proyecto. Esto no significa necesariamente eliminar físicamente el almacén, sino dejar de utilizarlo como apoyo estructural para CX y FSA/FSK. Si estos materiales pueden absorberse dentro de un sistema automatizado en Werk 12, F009 puede liberarse, reducir su carga operacional o destinarse a otros usos menos críticos.

5.8.c Automatización mediante VLM

La tercera oportunidad es implementar módulos verticales de almacenamiento. Los VLM permiten aumentar densidad, reducir superficie ocupada, mejorar ergonomía y acercar el material al operador. En el contexto de HYDAC, esta alternativa fue especialmente atractiva porque podía apoyar la consolidación de materiales, reducir recorridos y alinearse con SAP EWM. Sin embargo, el diagnóstico también mostró que la decisión no podía limitarse a instalar un solo módulo, sino que debía evaluarse el número adecuado de unidades.

5.8.d Clasificación de materiales según rotación

Otra oportunidad importante consiste en clasificar materiales según su comportamiento de movimiento. Los materiales de alta rotación, o fast movers, deberían ubicarse de forma que permitan acceso rápido y estable. En cambio, materiales de menor rotación pueden ocupar posiciones menos críticas. Esta lógica permite mejorar el rendimiento del sistema y evitar que todos los materiales sean tratados de la misma manera.

5.8.e Reducción de movimientos 315

La reducción de relocalizaciones internas constituye una oportunidad directa de ahorro y simplificación. Si los materiales se consolidan en ubicaciones más adecuadas, disminuye la necesidad de trasladarlos internamente entre zonas. Esto reduce tiempo no productivo, costos logísticos y complejidad operacional.

5.8.f Integración con SAP EWM

La integración con SAP EWM representa una oportunidad estratégica. Una solución automatizada debe permitir ubicaciones claras, confirmación digital, trazabilidad y control de tareas. De esta forma, el almacén físico puede alinearse con el sistema de información, reduciendo procesos manuales y mejorando la transparencia del inventario.

5.8.g Automatización complementaria del transporte interno

Finalmente, el diagnóstico abrió una oportunidad adicional relacionada con transporte interno mediante AMR. Una vez que los materiales se consolidan en VLM, surge la pregunta de cómo moverlos hacia estaciones de trabajo de forma eficiente. Por ello, la evaluación de AMR se consideró como una extensión futura de la arquitectura intralogística, especialmente para transportar materiales desde los módulos hacia puntos de consumo y retornar cajas vacías.

5.9 Digitalización del registro de inventario no rotulado: HyScan

Durante el levantamiento en terreno se identificó una brecha operacional concreta: parte del inventario físico no se encontraba rotulado bajo el estándar SAP, especialmente cajas con etiquetas impresas antiguas y códigos escritos a mano. Regularizar cada caja exigía transcribir manualmente la información, buscar el material en SAP y generar su etiqueta, un proceso lento y propenso a errores. Como iniciativa de digitalización complementaria al proyecto, se desarrolló y probó una herramienta denominada HyScan, orientada a acelerar este registro bajo supervisión del encargado de almacén.

HyScan opera sobre el iPad del área o cualquier tablet de la empresa. El operador fotografía la caja con la aplicación HyScan Capture; el motor de visión identifica automáticamente el nombre rotulado impreso y el código escrito a mano, y propone un registro pre-llenado con el material SAP correspondiente. El encargado revisa y valida la propuesta, el registro se confirma contra SAP y el sistema genera e imprime inmediatamente la etiqueta SAP-QR de la caja. De esta forma, el conteo y la regularización de inventario disperso se realizan en una fracción del tiempo, manteniendo el control humano sobre cada confirmación.

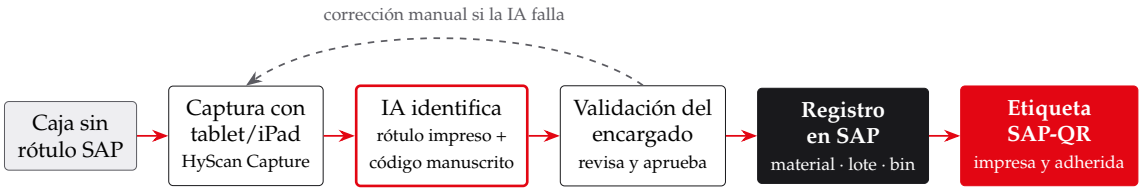


Figure 5.9: Flujo del proceso HyScan: de la caja sin rótulo SAP a la caja registrada y etiquetada con SAP-QR, siempre bajo validación del encargado.

La experiencia con HyScan mostró que la combinación de visión por computador y validación humana permite regularizar inventario a una fracción del tiempo del proceso manual, manteniendo la trazabilidad exigida por SAP. Además de resolver una necesidad puntual del diagnóstico, la herramienta es coherente con la dirección de Nordstern 2026: menos papel, más control digital y una base de datos de ubicaciones confiable, condición necesaria para la futura integración con SAP EWM y para la operación de los módulos verticales propuestos en esta memoria.

5.10 Síntesis del diagnóstico

El diagnóstico del sistema actual permitió concluir que HYDAC Werk 12 enfrentaba un problema estructural de capacidad, dispersión y eficiencia operacional. CX se encon-

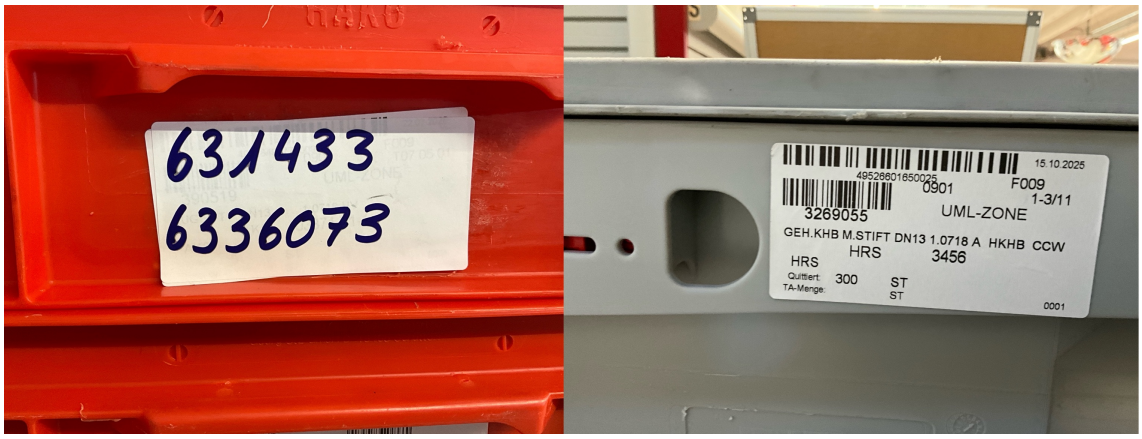


Figure 5.10: Inventario en terreno. A la izquierda, caja con el código escrito a mano sin rótulo SAP estandarizado; a la derecha, etiqueta impresa con código de barras, material, zona (UML-ZONE), almacén (F009) y ubicación. La brecha entre ambos formatos es la que motivó la herramienta de registro asistido.

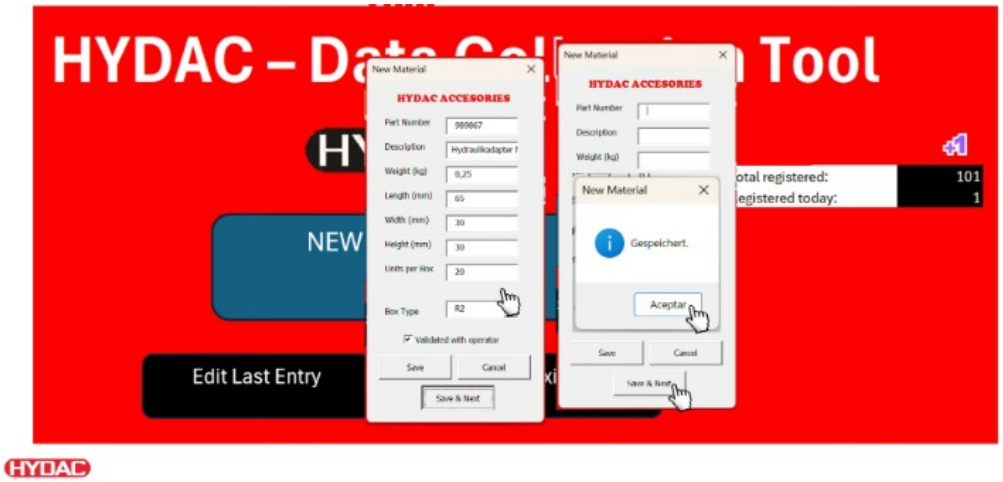


Figure 5.11: Aplicación de registro HYDAC Data Collection Tool: formulario de nuevo material con los campos capturados (número de parte, descripción, peso, dimensiones, unidades por caja, tipo de caja) y la casilla *Validated with operator*. Al guardar, el registro queda confirmado (*Gespeichert*) y avanza al siguiente.

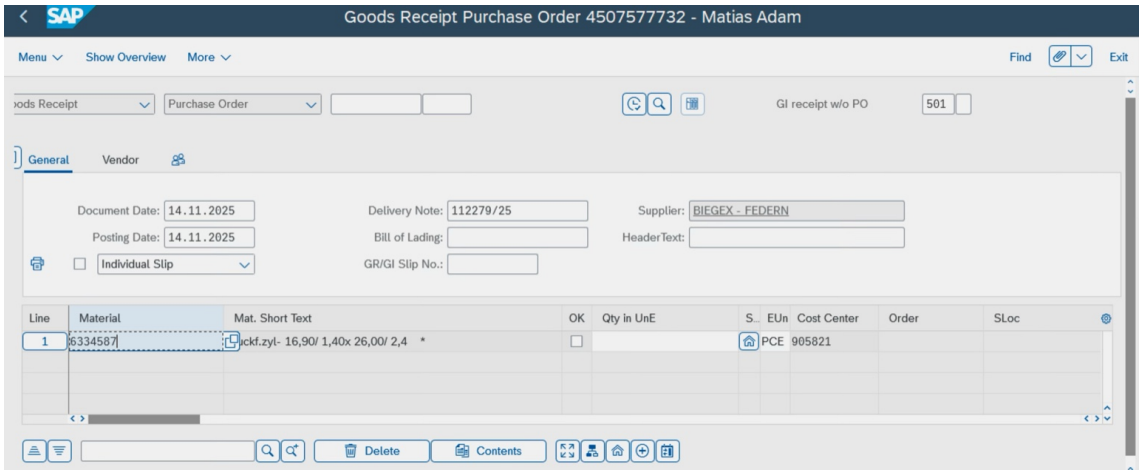


Figure 5.12: Registro AUTOMÁTICO en SAP: entrada de mercancía (*Goods Receipt*) del material sobre la orden de compra, donde se confirma la posición, la cantidad recibida y el centro de costo.

traba parcialmente fuera del núcleo principal de Werk 12, FSA/FSK dependía de F009 y presentaba una alta carga de movimientos hacia producción, mientras que el sistema completo requería una transición hacia un concepto más compacto, automatizado e integrado con SAP EWM.

Los datos de capacidad mostraron que la disponibilidad actual para CX dentro del área 9600 era insuficiente frente a los objetivos de consolidación. El análisis de F009 mostró que FSA/FSK ocupaba una fracción relativamente pequeña de un almacén auxiliar grande, pero generaba una carga operacional importante. Los movimientos SAP permitieron confirmar que el consumo hacia producción y las relocalizaciones internas eran drivers relevantes del problema. Las observaciones en terreno permitieron complementar estos datos con evidencia de dispersión, recorridos, dependencia de áreas auxiliares y oportunidades ergonómicas.



Figure 5.13: Resumen del diagnóstico As Is: indicadores clave que evidencian fragmentación, dispersión y alta carga operacional.

En síntesis, el diagnóstico demuestra que el problema no podía resolverse únicamente agregando posiciones de almacenamiento de forma tradicional. La situación requería una solución capaz de aumentar densidad, consolidar materiales, reducir relocalizaciones, mejorar ergonomía, sostener altos volúmenes de picking y prepararse para SAP EWM. Esta conclusión justifica el desarrollo de los capítulos siguientes, donde se analiza la información SAP con mayor detalle, se modela la capacidad requerida y se evalúan alternativas de automatización para determinar la configuración óptima.

6 Análisis de Datos SAP

6.1 Datos utilizados

El análisis de datos SAP constituye una de las bases cuantitativas principales de esta memoria, ya que permitió transformar la situación observada en terreno en evidencia operacional medible. Durante el diagnóstico inicial se identificaron problemas asociados a capacidad, dispersión del inventario, dependencia de F009 y relocalizaciones internas, sin embargo, para justificar una decisión de automatización no era suficiente describir estos problemas de manera cualitativa. Era necesario cuantificar el comportamiento real del sistema, identificar qué movimientos generaban mayor carga operacional y entender cuáles familias de materiales impulsaban la necesidad de modernización.

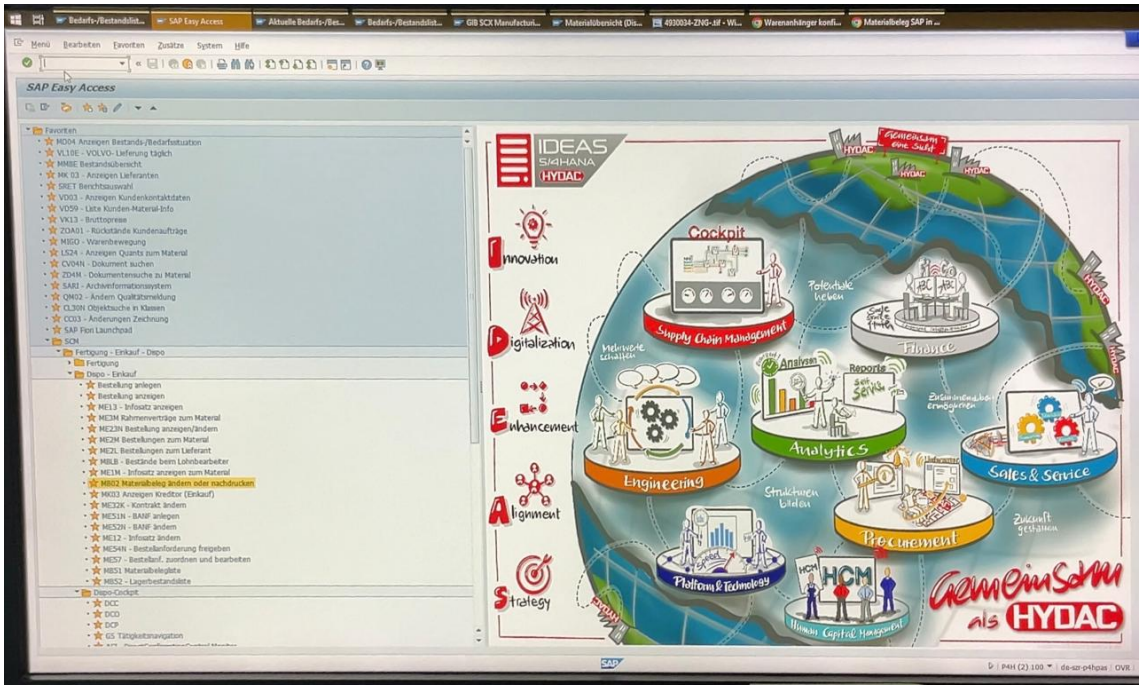


Figure 6.1: Entorno SAP S/4HANA de HYDAC (SAP Easy Access) y la visión IDEAS HYDAC PROYECTO 2030.

Los datos utilizados provinieron de SAP y corresponden principalmente a movimientos de inventario asociados a las operaciones CX y FSA/FSK en el entorno de Werk 12. El período principal de análisis histórico consideró movimientos registrados entre los años 2021 y 2024, mientras que para caracterizar la situación operacional reciente también se

utilizaron datos agregados de abril de 2025. Esta combinación permitió observar tanto tendencias históricas como una fotografía operativa actual del sistema.

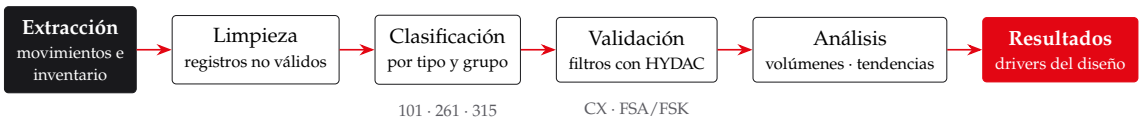


Figure 6.2: Pipeline del análisis de datos SAP: desde la extracción de movimientos hasta los resultados que orientan el dimensionamiento de la solución.

El análisis se concentró en tres tipos de movimientos SAP: 101, 261 y 315. Estos movimientos fueron seleccionados porque representan procesos fundamentales dentro de la operación de almacén. El movimiento 101 se relaciona con recepción de materiales, el movimiento 261 con consumo hacia producción y el movimiento 315 con relocalizaciones internas entre ubicaciones. En conjunto, estos tres movimientos permiten observar entrada, salida hacia producción y reorganización interna del sistema.

Table 6.1: Movimientos SAP considerados en el análisis

Movimiento SAP	Proceso asociado	Interpretación para la memoria
101	Recepción de materiales	Permite analizar la entrada de materiales al sistema de almacenamiento
261	Consumo hacia producción	Representa el picking necesario para abastecer procesos productivos
315	Relocalización interna	Permite identificar traslados entre ubicaciones y reorganización de stock

El análisis también consideró distintas áreas físicas. Las ubicaciones más relevantes fueron Werk 12b, el área 9600 dentro de Werk 12 y F009. Estas áreas no fueron seleccionadas al azar, sino porque representaban los principales puntos donde se almacenaban o movían materiales asociados a CX y FSA/FSK. El área 9600 fue especialmente importante porque corresponde a una zona objetivo dentro de Werk 12, mientras que F009 fue relevante por su rol como almacén auxiliar y zona de overflow.

A nivel de grupos de materiales, el análisis se enfocó en CX y FSA/FSK. CX fue relevante por su relación directa con la estrategia de consolidación hacia Werk 12 y por su capacidad limitada dentro del área 9600. FSA/FSK fue relevante por su alto volumen de movimientos hacia producción y por su dependencia parcial de F009. Esta selección permitió concentrar el análisis en las familias que realmente impulsaban la necesidad de una solución automatizada.

6.2 Extracción y tratamiento de datos

La extracción de datos SAP no fue una actividad meramente administrativa. Al inicio del proyecto fue necesario comprender cómo HYDAC estructuraba sus movimientos, qué ubicaciones estaban asociadas a cada área, qué filtros debían utilizarse y cómo interpretar correctamente cada tipo de transacción. Esta etapa requirió coordinación con colegas de Werk 12 y validación con el equipo de logística, ya que una interpretación incorrecta de los códigos SAP podía distorsionar el diagnóstico completo.

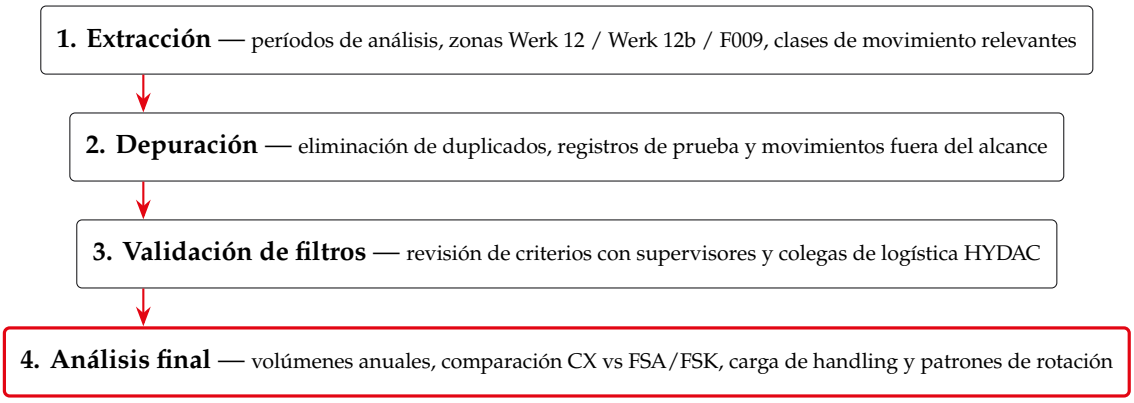


Figure 6.3: Etapas del tratamiento de los datos SAP, desde la extracción hasta el análisis final validado con el equipo de HYDAC.

El proceso de tratamiento de datos se organizó en cinco pasos. Primero, se identificaron las familias de materiales relevantes, principalmente CX y FSA/FSK. Segundo, se definieron las zonas de almacenamiento a analizar, especialmente 9600 y F009. Tercero, se seleccionaron los movimientos SAP asociados a recepción, consumo y relocalización. Cuarto, se limpiaron y organizaron los datos por tipo de movimiento, año y grupo de materiales. Quinto, se validaron los resultados con personal de HYDAC para asegurar que la lectura operacional fuera correcta.

Una dificultad importante fue que los datos SAP muestran eventos registrados en el sistema, pero no necesariamente explican por sí solos la lógica física detrás de cada movimiento. Por ejemplo, un movimiento 315 puede aparecer como una relocalización interna, pero para entender su impacto real es necesario saber si el material se movió entre zonas cercanas, entre áreas con alta distancia o desde un almacén auxiliar como F009. Por ello, el análisis SAP se interpretó junto con el diagnóstico de terreno y el layout de la planta.

También fue necesario diferenciar entre capacidad estática y actividad operacional. La capacidad estática indica cuántas posiciones existen o están disponibles, mientras que la actividad operacional muestra cuántas veces los materiales se mueven. Esta diferencia fue especialmente importante porque una familia de materiales puede ocupar pocas posiciones pero generar muchos movimientos, lo que la convierte en crítica para la operación. Este fue precisamente uno de los hallazgos relevantes para FSA/FSK.

Table 6.2: Etapas del tratamiento de datos SAP

Etapa	Descripción
Identificación de materiales	Selección de familias CX y FSA/FSK como foco del análisis
Selección de áreas	Consideración de área 9600, F009 y zonas asociadas a Werk 12 y Werk 12b
Selección de movimientos	Análisis de movimientos 101, 261 y 315
Limpieza y estructuración	Organización de datos por período, movimiento, grupo de materiales y ubicación
Validación operacional	Revisión de interpretación con colegas y supervisores de HYDAC

6.3 Movimientos SAP

Los movimientos SAP analizados permitieron construir una lectura estructurada del sistema logístico. Cada tipo de movimiento entregó una señal distinta sobre la operación. El movimiento 101 mostró la entrada de materiales, el movimiento 261 reveló la presión de abastecimiento hacia producción y el movimiento 315 mostró el nivel de reorganización interna del almacén.

6.3.a Movimiento 101

El movimiento 101 corresponde a la recepción de materiales, o Wareneingang, que significa entrada de mercancía. Este movimiento representa el ingreso de materiales al sistema de almacenamiento y permite observar la carga asociada a la recepción. En términos operacionales, un volumen alto de movimientos 101 puede implicar mayor trabajo de registro, ubicación, inspección y almacenamiento inicial.

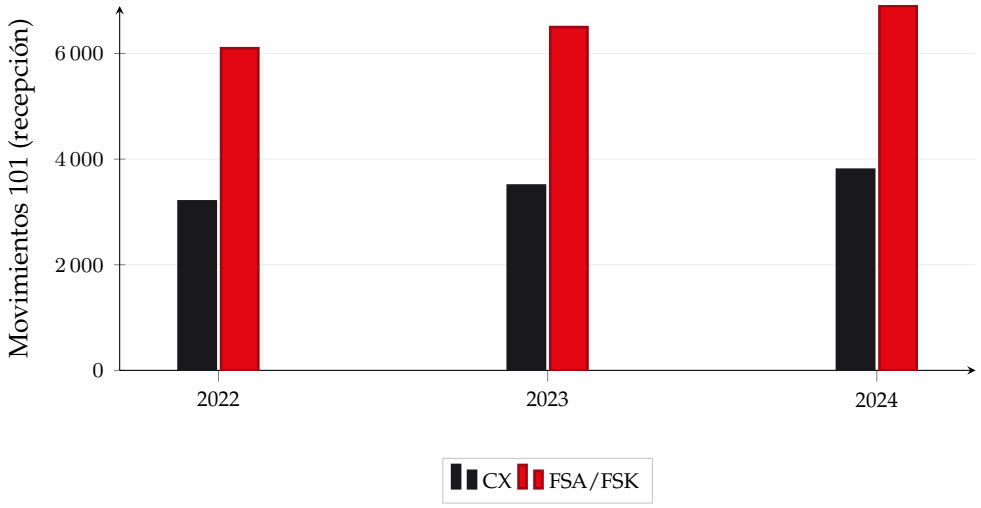


Figure 6.4: Evolución anual de los movimientos 101 (recepción de mercancía) para CX y FSA/FSK.

En el caso de CX, el análisis identificó 830 movimientos 101 acumulados en el área 9600, con un promedio histórico aproximado de 207 movimientos por año. Esto indica que la recepción de CX existe de forma estable, pero no representa el principal driver de

carga operacional. En otras palabras, CX requiere un proceso confiable de entrada, pero el mayor esfuerzo no se concentra en recibir el material, sino en abastecer producción y gestionar las ubicaciones.

Para FSA/FSK, el análisis identificó 451 movimientos 101 en el área 9600, con un promedio anual histórico aproximado de 796 movimientos. Aunque este resultado debe interpretarse cuidadosamente por la forma en que los datos se agrupan entre períodos y ubicaciones, la lectura general muestra que FSA/FSK mantiene una actividad relevante de entrada y que su operación no puede evaluarse únicamente desde el stock disponible.

Desde la perspectiva del proyecto, los movimientos 101 fueron útiles para comprender la entrada de materiales al sistema, pero no fueron los principales argumentos para justificar la automatización. Su importancia fue más bien complementaria, ya que ayudaron a entender que cualquier solución futura debía permitir un proceso ordenado de recepción y almacenamiento, especialmente si se buscaba integración con SAP EWM.

6.3.b Movimiento 261

El movimiento 261 corresponde al consumo de materiales hacia producción. Este fue el movimiento más importante para el análisis operacional, porque representa la demanda real del sistema de almacenamiento desde la perspectiva de producción. Cada movimiento 261 implica que un material debe ser ubicado, retirado y entregado para alimentar un proceso productivo. Por lo tanto, este movimiento se relaciona directamente con picking, disponibilidad de material y tiempos de respuesta.

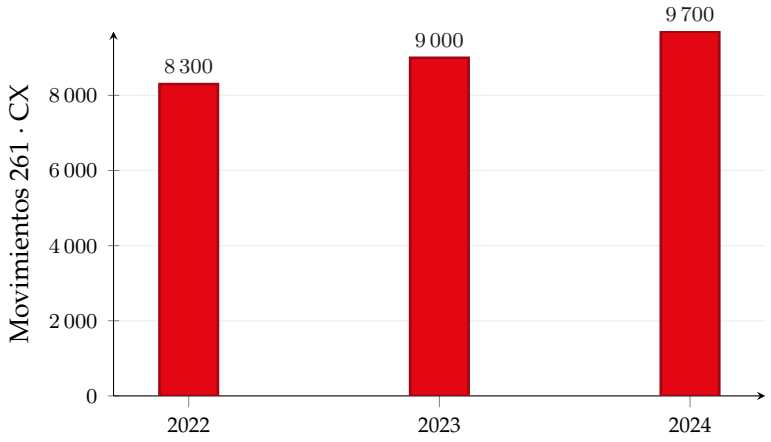


Figure 6.5: Movimientos 261 (consumo hacia producción) de CX por año.

En el caso de CX, el análisis identificó 38,138 movimientos 261 acumulados en el área 9600, con un promedio anual aproximado de 9,534 movimientos. El desglose histórico mostró un aumento importante desde 2021 hasta 2024, lo que sugiere una presión creciente sobre el sistema de almacenamiento. Este comportamiento fue especialmente relevante porque confirmó que CX no solo requería capacidad, sino también una solución capaz de sostener una frecuencia significativa de picking hacia producción.

Para FSA/FSK, el movimiento 261 fue aún más crítico. El análisis identificó 19,786 movimientos actuales en el área 9600, mientras que el promedio anual histórico superó los 31,000 movimientos. Esta magnitud convirtió a FSA/FSK en uno de los principales drivers operacionales del proyecto. Incluso si su footprint físico en F009 era menor que el

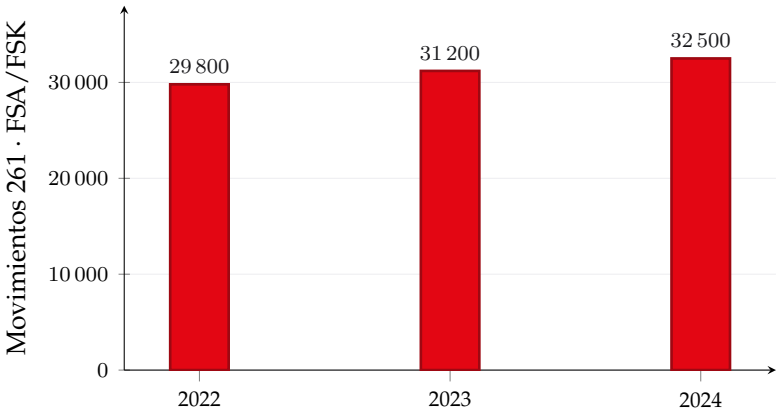


Figure 6.6: Movimientos 261 (consumo hacia producción) de FSA/FSK por año: el promedio del período supera los 31 000 movimientos anuales.

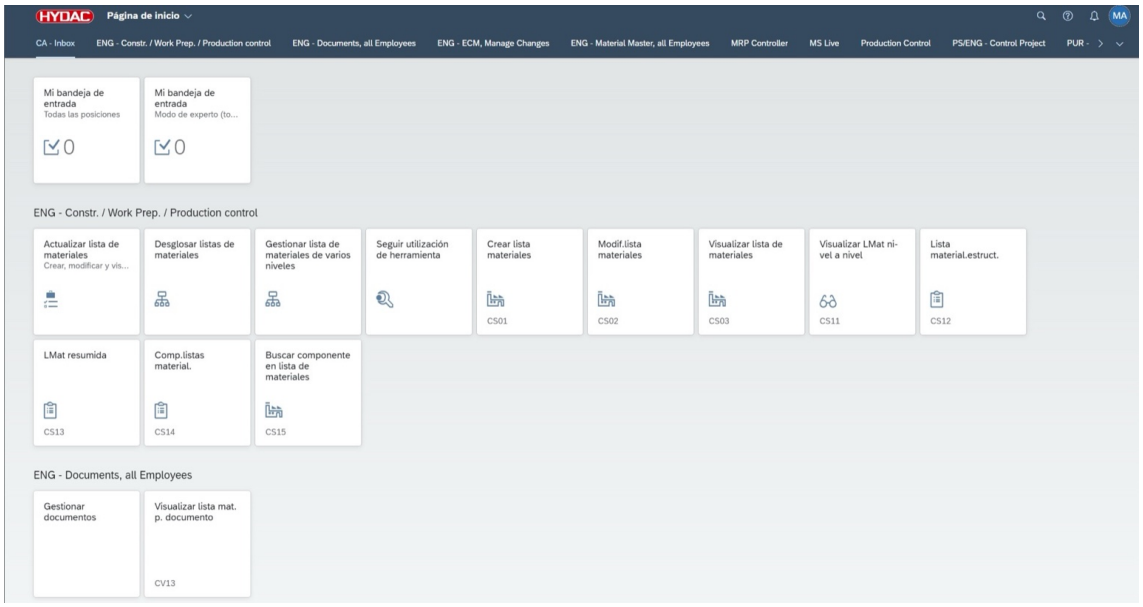


Figure 6.7: Fiori SAP launchpad de HYDAC con las aplicaciones de gestión de materiales, listas de materiales (CS01–CS15), brindando el acceso de TODOS LOS MOVIMIENTOS.

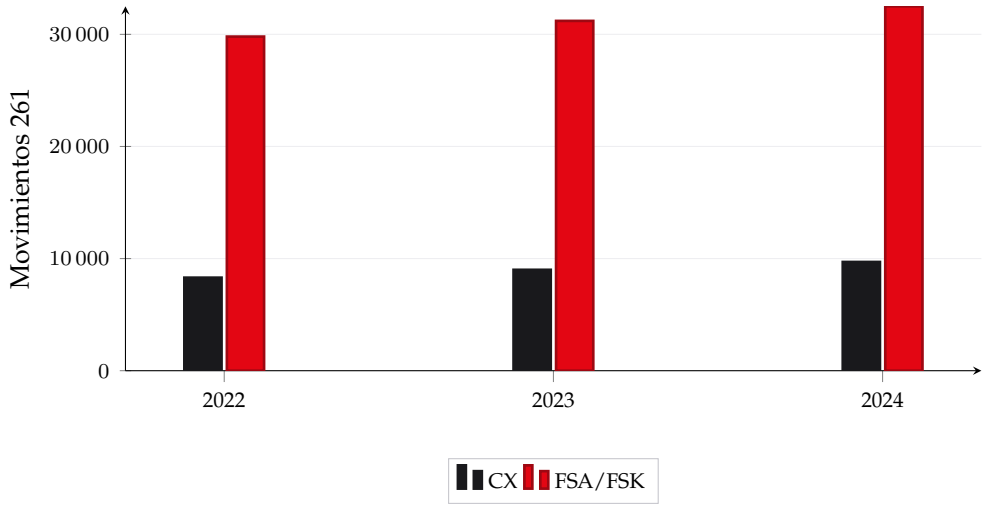


Figure 6.8: Comparación anual de movimientos 261 entre CX y FSA/FSK: FSA/FSK concentra la mayor carga de picking del sistema.

total del almacén, su intensidad de consumo hacia producción hacía que su ubicación y forma de almacenamiento fueran estratégicamente relevantes.

Table 6.3: Resumen de movimientos 261 para CX y FSA/FSK

Grupo	Movimiento 261 acumulado	Promedio anual aproximado	Interpretación
CX	38,138	9,534	Alta carga de picking hacia producción, con tendencia creciente
FSA/FSK	19,786	31,335	Driver operacional crítico por alto consumo hacia producción

El movimiento 261 permitió concluir que una solución futura debía diseñarse considerando throughput y no solamente capacidad de almacenamiento. Throughput se refiere a la capacidad del sistema para procesar movimientos en el tiempo. Un sistema puede tener suficiente espacio para almacenar materiales, pero si no puede responder rápidamente al consumo de producción, entonces no resuelve el problema real. Este punto fue clave para justificar por qué un solo módulo podía parecer suficiente desde el punto de vista de capacidad nominal, pero no necesariamente ser adecuado desde el punto de vista operacional.

6.3.c Movimiento 315

El movimiento 315 corresponde a relocalizaciones internas, también llamadas Umlagerungen, que significa traslados o reubicaciones internas. Este movimiento fue especialmente importante porque permitió observar el nivel de reorganización interna del sistema. A diferencia del movimiento 261, que abastece producción, el movimiento 315 no representa directamente una salida productiva, sino un movimiento dentro del almacén. Por ello, un volumen elevado de 315 puede interpretarse como señal de dispersión, falta de consolidación o necesidad constante de balancear ubicaciones.

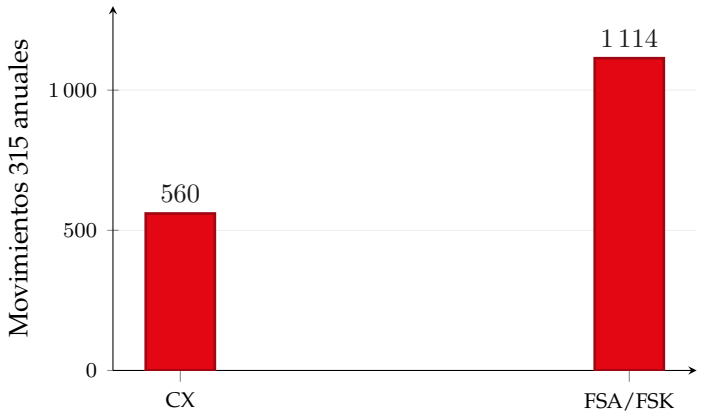


Figure 6.9: Relocalizaciones internas anuales (movimiento 315) para CX y FSA/FSK: retrabajo logístico derivado de la dispersión del inventario.

Para CX, el análisis identificó 1,775 movimientos 315 en el área 9600, con un promedio

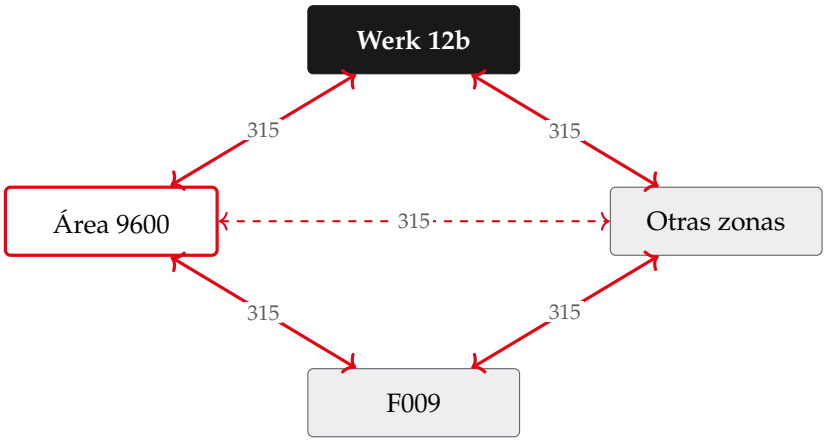


Figure 6.10: Las relocalizaciones 315 conectan permanentemente el área 9600, Werk 12b, F009 y otras zonas: evidencia de una estructura de almacenamiento dispersa.

anual aproximado de 443 movimientos. Además, F009 también generaba movimientos relacionados con CX, principalmente a través de relocalizaciones internas. Esto confirmó que CX no estaba completamente concentrado en una única estructura de almacenamiento, sino que dependía de traslados y reorganizaciones entre zonas.

Para FSA/FSK, el análisis identificó 1,279 movimientos 315 en el área 9600, con un promedio anual aproximado de 2,007 movimientos. Esta cifra fue especialmente relevante porque mostró una intensidad importante de reorganización interna. Si se considera además que FSA/FSK ocupaba solo 377 posiciones dentro de un F009 de 2,531 posiciones, se observa una combinación poco eficiente: pocos espacios dedicados, alta actividad de consumo y relocalizaciones relevantes.

Table 6.4: Resumen de movimientos 315 para CX y FSA/FSK

Grupo	Movimiento 315 acumulado	Promedio anual aproximado	Interpretación
CX	1,775	443	Reorganización interna asociada a dispersión entre áreas
FSA/FSK	1,279	2,007	Relocalizaciones relevantes y alta dependencia de estructura auxiliar

El movimiento 315 fue uno de los argumentos más fuertes para evaluar una solución de consolidación. Si los materiales se concentran dentro de un sistema automatizado en Werk 12, la necesidad de relocalizar internamente puede reducirse. Esto tiene impacto operacional, porque disminuye tiempos no productivos, y también impacto económico, porque cada relocalización tiene un costo asociado. Por esta razón, los movimientos 315 fueron utilizados posteriormente en el cálculo de ahorros logísticos.

6.4 Análisis agregado de abril 2025

Además del análisis histórico 2021 a 2024, se consideró información agregada de abril de 2025 para caracterizar la actividad reciente de Werk 12. Este análisis permitió observar una fotografía operacional del sistema en un mes específico y sirvió como base para dimensionar el volumen de manipulación.

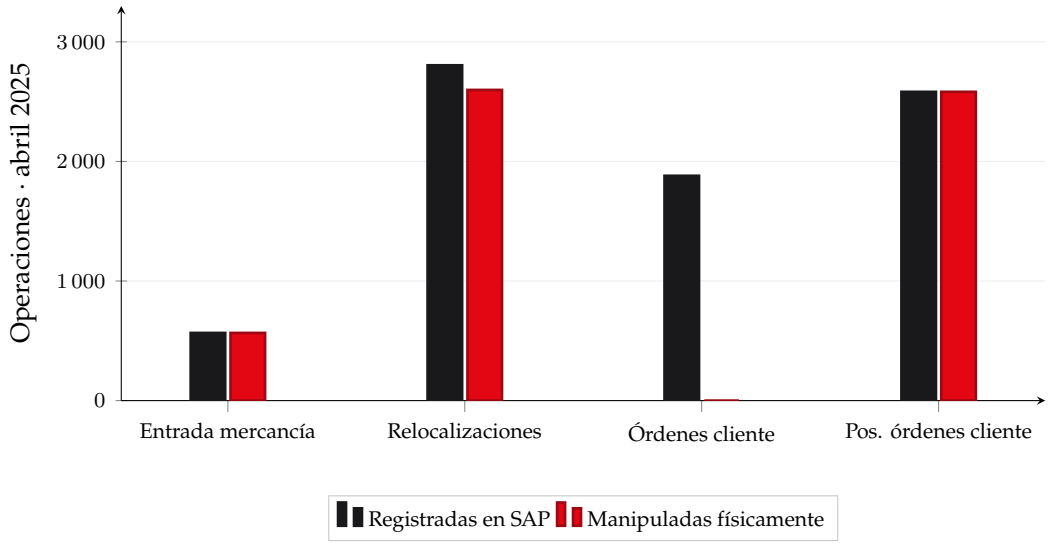


Figure 6.11: Movimientos SAP y manipulación física en Werk 12 durante abril de 2025: en conjunto, más de 5 900 operaciones de handling en un solo mes.

En abril de 2025, Werk 12 registró 566 posiciones de entrada de mercancía, 2,804 relocalizaciones, 1,880 órdenes de cliente y 2,582 posiciones asociadas a órdenes de cliente. Desde la perspectiva de manipulación física, se registraron 566 posiciones de entrada manipuladas, 2,598 relocalizaciones internas manipuladas y 2,582 posiciones de cliente manipuladas. En conjunto, estas cifras superan las 5,900 operaciones de handling en un solo mes.

Table 6.5: Movimientos y handling en Werk 12 durante abril de 2025

Métrica	Cantidad
Posiciones de entrada de mercancía	566
Relocalizaciones registradas	2,804
Órdenes de cliente	1,880
Posiciones de órdenes de cliente	2,582
Posiciones de entrada manipuladas	566
Relocalizaciones internas manipuladas	2,598
Posiciones de cliente manipuladas	2,582
Total aproximado de operaciones de handling	Más de 5,900

Este resultado confirmó que el almacén tenía una carga operacional considerable. La cifra de más de 5,900 operaciones de manipulación en un mes no debe interpretarse como un número aislado, sino como una señal de presión sobre el sistema físico. Cada movimiento implica tiempo, desplazamiento, registro, manipulación, riesgo de error y

necesidad de coordinación. Cuando parte de estos movimientos ocurre en una estructura dispersa, el impacto se amplifica.

El análisis de abril de 2025 también permitió conectar la dimensión operacional con la evaluación económica. Si el sistema genera miles de movimientos mensuales, cualquier reducción en tiempo por movimiento, distancia recorrida o relocalización interna puede transformarse en un ahorro anual significativo. Por ello, los datos SAP no fueron utilizados únicamente para describir la situación, sino también para alimentar el cálculo de beneficios.

6.5 Clasificación de materiales

La clasificación de materiales fue necesaria para entender que no todos los materiales generan el mismo impacto operacional. En un sistema de almacenamiento, algunos materiales ocupan muchas posiciones pero se mueven poco, mientras otros ocupan pocas posiciones pero se mueven con mucha frecuencia. Esta diferencia es clave para diseñar una solución automatizada, porque el criterio de ubicación no debe depender solo del volumen almacenado, sino también de la frecuencia y criticidad de movimiento.

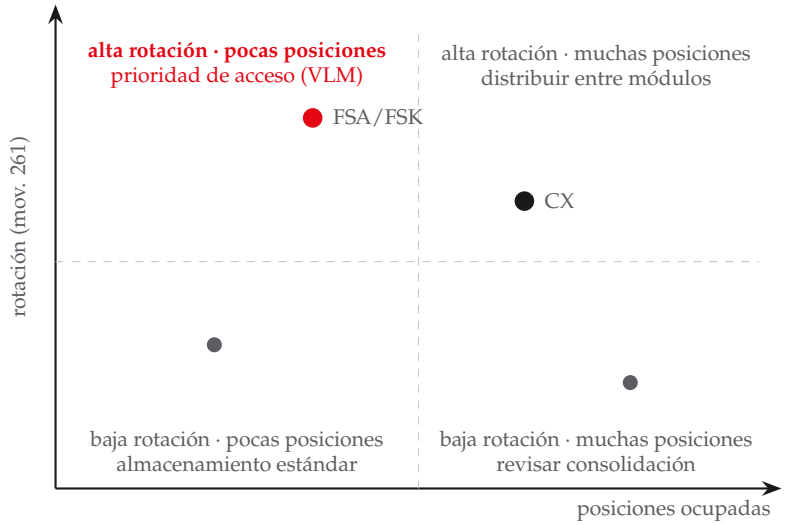


Figure 6.12: Matriz conceptual rotación versus posiciones: FSA/FSK combina pocas posiciones con altísima rotación, mientras CX requiere consolidación con rotación relevante.

La clasificación también permitió entender por qué la capacidad nominal no era suficiente para decidir. Si solo se suman posiciones, una configuración pequeña podría parecer adecuada. Sin embargo, cuando se considera la necesidad de separar materiales de alta rotación, evitar cuellos de botella y mantener disponibilidad ante picos de consumo, aparece la necesidad de una configuración más robusta. Esta lógica será utilizada posteriormente en el modelamiento de capacidad y en la optimización.

En el caso de CX y FSA/FSK, el movimiento 261 permitió identificar materiales o familias con alta relación con producción. Estos materiales pueden entenderse como fast movers, es decir, materiales de alta rotación que requieren acceso frecuente y confiable. En un sistema automatizado, los fast movers deberían distribuirse de forma que no generen congestión en una sola unidad y permitan mantener estabilidad en tiempos de respuesta.

La clasificación de materiales no buscó construir un catálogo definitivo de todos los

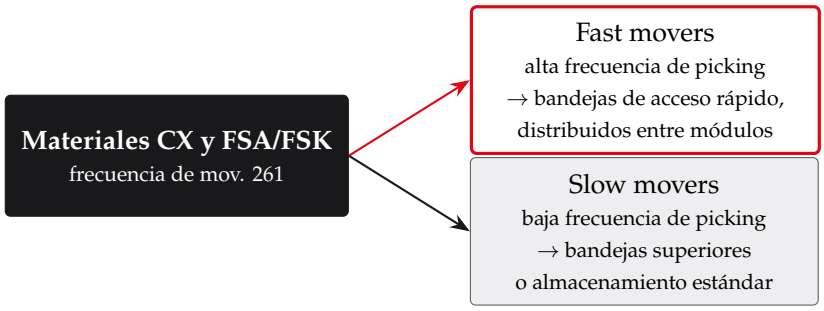


Figure 6.13: Clasificación operacional de materiales según frecuencia de consumo: los fast movers definen los requerimientos de acceso y throughput de la solución.

Table 6.6: Criterios utilizados para clasificar materiales desde SAP

Criterio	Interpretación
Frecuencia de movimiento 261	Identifica materiales con alto consumo hacia producción
Frecuencia de movimiento 315	Identifica materiales sujetos a relocalizaciones o dispersión
Ubicación física	Permite distinguir materiales en 9600, F009 o Werk 12b
Familia de material	Permite separar CX, FSA/FSK y otros grupos
Necesidad de consolidación	Evalúa si el material debe migrar hacia una solución centralizada

SKUs de HYDAC, sino generar una lógica de decisión para el proyecto. El objetivo era identificar qué grupos justificaban automatización, qué flujos debían priorizarse y qué condiciones debía cumplir la solución futura. En este sentido, SAP funcionó como una fuente de evidencia para pasar desde una percepción general de alta carga logística hacia una priorización basada en datos.

6.6 Análisis por grupo de materiales

6.6.a CX

CX fue analizado como un grupo estratégico debido a su relación directa con Nordstern 2026 y la necesidad de consolidación dentro de Werk 12. Desde la perspectiva de capacidad, CX tenía 562 posiciones activas en Werk 12b y 150 posiciones disponibles en el área 9600, lo que generaba un footprint de 712 posiciones. Desde la perspectiva de movimientos, CX presentaba una carga importante en el movimiento 261, con 38,138 movimientos acumulados y un promedio anual aproximado de 9,534 movimientos.

La interpretación de estos datos es clara. CX no solo necesitaba más capacidad dentro de Werk 12, sino también una ubicación que permitiera sostener su flujo hacia producción. El hecho de que una parte relevante estuviera en Werk 12b y solo una parte limitada en 9600 indicaba una operación dividida. Esta división era incompatible con el objetivo de consolidación y digitalización planteado para Nordstern 2026.

El análisis SAP también mostró que el movimiento 315 estaba presente en CX, lo que indica reorganización interna. Aunque el volumen de 315 para CX era menor que el de 261, su existencia reforzó la idea de que el sistema actual necesitaba mayor estabilidad

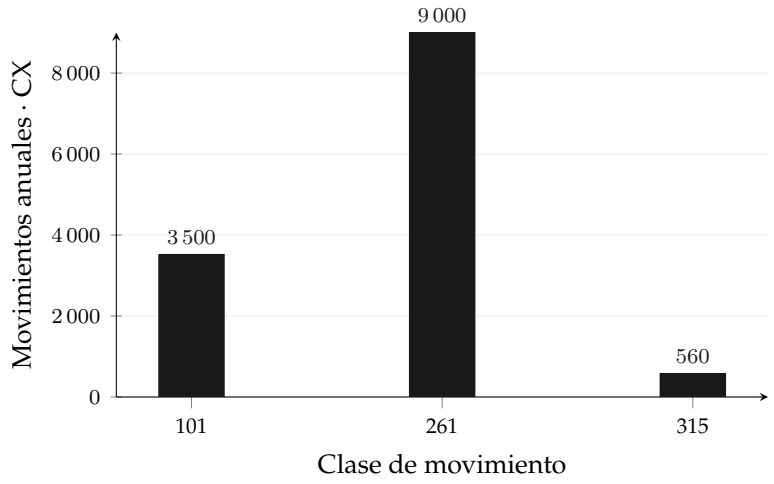


Figure 6.14: Perfil de movimientos SAP de CX: el consumo hacia producción domina la carga, complementado por recepciones y relocalizaciones internas.

de ubicaciones. En una operación futura, consolidar CX en módulos verticales permitiría reducir dispersión, mejorar acceso y facilitar integración con SAP EWM.

6.6.b FSA/FSK

FSA/FSK fue analizado como un grupo crítico por su alto volumen de consumo hacia producción y su relación con F009. Aunque FSA/FSK tenía 377 posiciones asignadas dentro de F009, su impacto operacional era mucho mayor de lo que ese número podría sugerir. El análisis de movimientos 261 mostró un promedio anual superior a 31,000 movimientos, lo que lo convierte en un driver principal de picking.

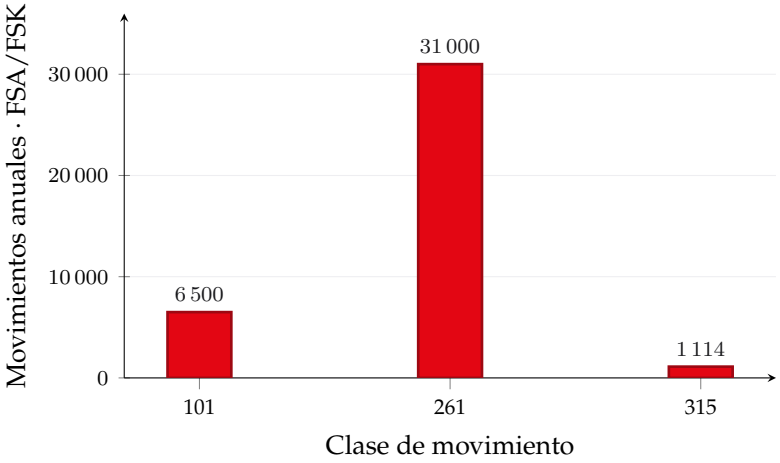


Figure 6.15: Perfil de movimientos SAP de FSA/FSK: más de 31 000 consumos anuales hacia producción convierten a esta familia en el principal driver de picking del sistema.

Además, FSA/FSK presentaba movimientos 315 relevantes, lo que sugiere relocalizaciones internas y dispersión. Esta condición es consistente con el hecho de que F009 no estaba dedicado exclusivamente a FSA/FSK, sino compartido con otros materiales. En consecuencia, los operadores debían interactuar con una estructura menos compacta y más compleja.

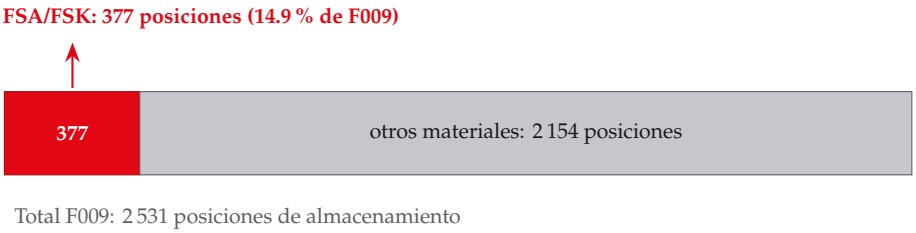


Figure 6.16: Posiciones FSA/FSK dentro del almacén auxiliar F009: una fracción menor del área total, pero con impacto operacional alto por su rotación.

Desde el punto de vista del diseño futuro, FSA/FSK justificó fuertemente la automatización. Un grupo con alta frecuencia de consumo y dependencia de almacén auxiliar es un candidato natural para consolidación en un sistema de mayor densidad y mejor acceso. Además, su alta actividad de picking permitió justificar que la solución no debía centrarse solamente en capacidad, sino también en throughput y distribución de fast movers.

6.7 Resultados obtenidos

El análisis SAP permitió obtener resultados relevantes para el diagnóstico y para los modelos posteriores. En primer lugar, confirmó que la operación de Werk 12 presentaba una carga de handling considerable, con más de 5,900 operaciones en abril de 2025. En segundo lugar, mostró que el movimiento 261 era el principal driver operacional para CX y especialmente para FSA/FSK. En tercer lugar, evidenció la existencia de movimientos 315 que reflejan relocalizaciones internas y dispersión del sistema. En cuarto lugar, permitió relacionar los datos de capacidad con el comportamiento real de los materiales.

Table 6.7: Hallazgos principales del análisis SAP

Hallazgo	Interpretación
Alta carga de handling mensual	El sistema registra más de 5,900 operaciones de manipulación en abril de 2025
Movimiento 261 dominante	El consumo hacia producción es el principal driver de picking
FSA/FSK altamente activo	FSA/FSK supera los 31,000 movimientos 261 anuales promedio
CX requiere consolidación	CX presenta capacidad limitada en 9600 y dependencia de Werk 12b
Movimientos 315 relevantes	Las relocalizaciones internas indican dispersión y necesidad de reorganización
F009 como zona crítica	F009 actúa como apoyo, pero aumenta complejidad y dependencia logística

Estos resultados permitieron transformar el diagnóstico en una base cuantitativa para la toma de decisiones. La automatización dejó de ser una posibilidad general y pasó a ser una respuesta a problemas medibles: alta frecuencia de picking, capacidad limitada, dispersión física, relocalizaciones internas y necesidad de integración futura. Además, los datos SAP entregaron insumos directos para el cálculo de ahorros, especialmente en lo relacionado con movimientos internos y posiciones de almacenamiento.

6.8 Implicancias para el modelamiento de capacidad

El análisis SAP tuvo implicancias directas para el modelo de capacidad. Primero, permitió identificar que la demanda de almacenamiento no podía definirse únicamente por posiciones actuales, ya que debía complementarse con la intensidad de movimientos. Segundo, permitió justificar la necesidad de considerar fast movers y no tratar todos los materiales de la misma manera. Tercero, permitió mostrar que F009 y Werk 12b no eran solo ubicaciones adicionales, sino síntomas de una estructura dispersa que debía ser corregida.



Figure 6.17: Rol de los datos SAP como base objetiva del modelamiento de capacidad, la evaluación económica y la optimización.

Una consecuencia importante fue que el modelo de capacidad debía considerar holgura operacional. Si se hubiera utilizado solo la demanda física actual, una sola unidad VLM podría parecer suficiente. Sin embargo, los datos SAP mostraron que la operación requería capacidad para sostener picking, distribuir materiales de alta rotación, reducir relocalizaciones y evitar cuellos de botella. Por esta razón, el análisis SAP ayudó a justificar la evaluación de escenarios con múltiples módulos.

El análisis también permitió alimentar la lógica de rendimientos decrecientes. La primera unidad automatizada captura una parte importante de los beneficios, porque permite absorber materiales críticos y reducir parte de la operación manual. Sin embargo, unidades adicionales generan beneficios marginales menores, ya que cada nuevo módulo agrega capacidad y redundancia, pero no elimina la misma cantidad de desperdicio que el primero. Esta lógica fue utilizada posteriormente en la evaluación financiera y el modelo de optimización.

6.9 Implicancias para la evaluación económica

Los datos SAP también fueron utilizados para conectar la operación con el impacto económico. Los movimientos 315 sirvieron como base para calcular ahorros por reducción de relocalizaciones internas. La cantidad de posiciones permitió calcular ahorros por eliminación de ubicaciones redundantes. La carga de handling permitió justificar ahorros asociados a reducción de tiempos de búsqueda, manipulación y desplazamiento. En conjunto, SAP permitió traducir movimientos físicos en flujos económicos.

Esta conexión es especialmente importante porque una inversión en automatización debe justificarse con beneficios concretos. No basta con afirmar que el sistema será más moderno. La empresa necesita entender cuánto valor genera la inversión, qué costos reduce, qué procesos mejora y cuánto tiempo demora en recuperarse el capital invertido.

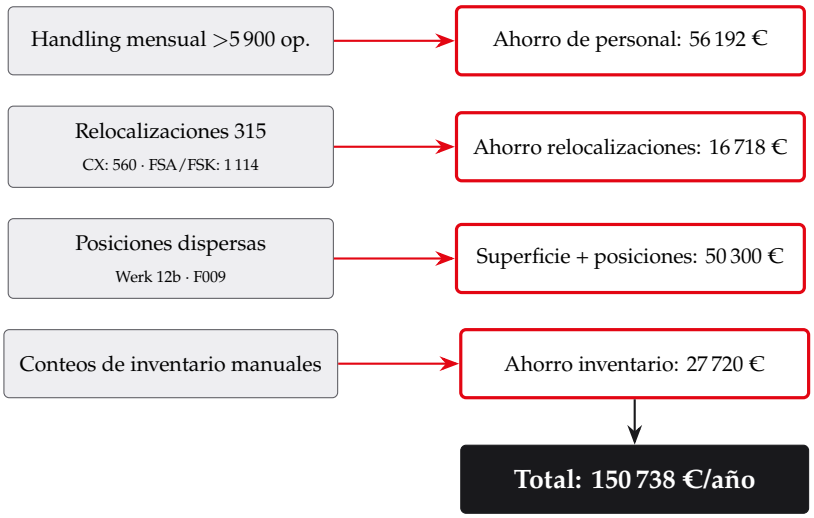


Figure 6.18: Transformación de la evidencia SAP en ahorros económicos: cada patrón operacional identificado en los datos se traduce en una categoría de beneficio cuantificado.

El análisis SAP aportó la base objetiva para construir esa justificación.

Además, los datos permitieron corregir estimaciones conservadoras presentes en cálculos preliminares. Al revisar movimientos y posiciones con mayor detalle, fue posible recalcular el potencial de ahorro anual y construir un modelo financiero más robusto. Esta etapa muestra cómo el análisis de datos puede mejorar directamente la calidad de una decisión de inversión.

6.10 Síntesis del análisis SAP

El análisis de datos SAP permitió confirmar y cuantificar los principales problemas observados durante el diagnóstico en terreno. La información extraída mostró que el sistema actual enfrentaba una carga operacional significativa, especialmente en movimientos 261 asociados al consumo hacia producción y movimientos 315 asociados a relocalizaciones internas. También permitió distinguir el comportamiento de CX y FSA/FSK, demostrando que ambos grupos tienen problemáticas distintas pero complementarias.

CX presenta una necesidad clara de consolidación, ya que se encuentra dividido entre Werk 12b y el área 9600, con capacidad limitada dentro de Werk 12. FSA/FSK, por su parte, muestra una actividad operacional muy alta, especialmente en consumo hacia producción, y una dependencia relevante de F009. Esta combinación permite concluir que la solución futura debe considerar tanto capacidad como rendimiento operacional.

En síntesis, SAP permitió pasar desde una intuición operacional hacia una decisión basada en datos. Los resultados de este capítulo justifican la necesidad de desarrollar un modelo de capacidad más completo, capaz de evaluar distintas configuraciones de almacenamiento automatizado y determinar si uno, dos, tres o más módulos Modula ML50D pueden responder a los requerimientos actuales y futuros de HYDAC Werk 12. Este modelamiento se desarrolla en el capítulo siguiente.

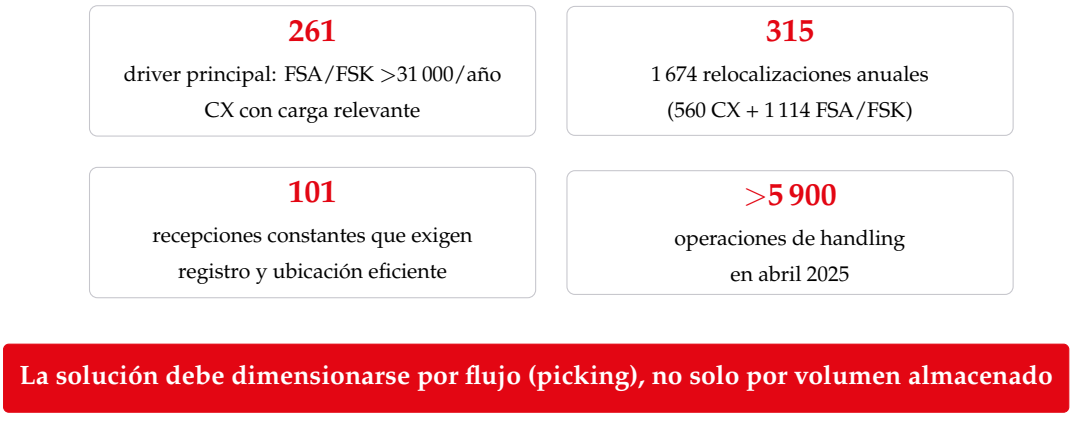


Figure 6.19: Síntesis del análisis SAP: los movimientos 101, 261 y 315 cuantifican la carga real del sistema y fundamentan la automatización.

7 Modelamiento de Capacidad

7.1 Introducción al modelamiento de capacidad

El modelamiento de capacidad constituye una de las etapas centrales de esta memoria, ya que permite transformar el diagnóstico operacional y los datos SAP en una evaluación cuantitativa de escenarios. Después de identificar que CX y FSA/FSK se encontraban distribuidos entre Werk 12b, el área 9600 y F009, y después de confirmar que existían altos volúmenes de consumo hacia producción y relocalizaciones internas, era necesario responder una pregunta concreta: cuántas posiciones de almacenamiento se requieren realmente y qué configuración de módulos verticales permite absorber esa demanda de manera operacionalmente robusta.

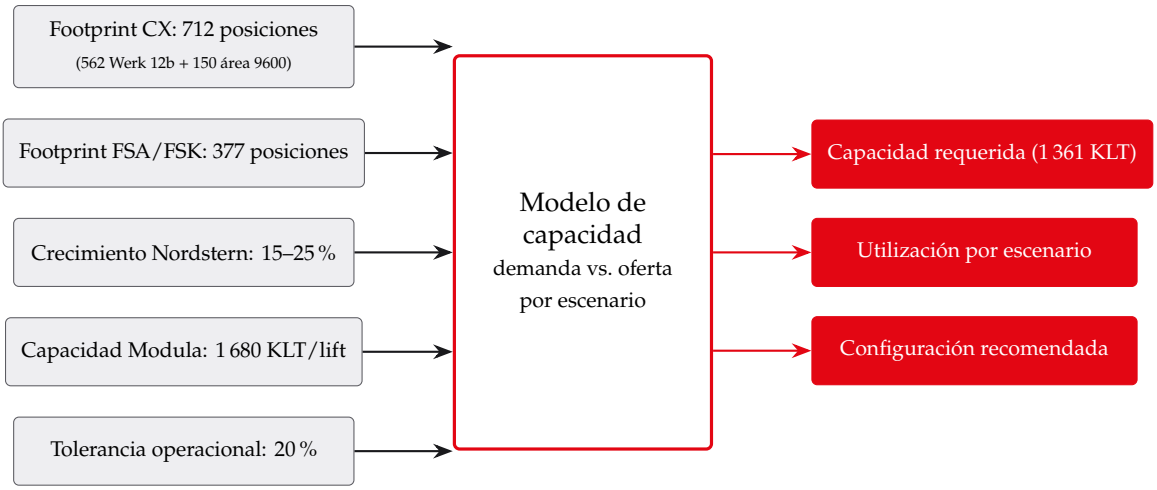


Figure 7.1: Estructura general del modelo de capacidad: entradas operacionales y estratégicas, cálculo comparativo y salidas para la decisión.

El objetivo de este capítulo no es solamente calcular si los materiales caben físicamente dentro de un Modula ML50D. Esa sería una lectura incompleta del problema. En una operación industrial real, la capacidad debe entenderse desde dos perspectivas: capacidad física y capacidad operacional. La capacidad física responde a la pregunta de cuántos KLT pueden almacenarse. La capacidad operacional responde a una pregunta más exigente: si esa configuración puede sostener el flujo real de picking, separar materiales de alta rotación, entregar holgura para crecimiento, reducir la dependencia de F009 y evitar cuellos de botella en la operación diaria.

Esta distinción fue fundamental en el proyecto. Desde una mirada puramente volumétrica,

una sola unidad Modula podría parecer suficiente para absorber el footprint actual de CX y FSA/FSK. Sin embargo, al considerar los requerimientos de Nordstern 2026, los movimientos SAP, la separación de fast movers, la redundancia, la utilización máxima recomendada y la futura integración con SAP EWM, se hace evidente que el problema no puede resolverse con una simple comparación entre posiciones requeridas y posiciones disponibles. Por ello, el modelo de capacidad se construyó como una herramienta de apoyo a la decisión, no como una simple tabla de almacenamiento.

7.2 Objetivo del modelo de capacidad

El objetivo del modelo de capacidad es determinar qué configuración de módulos Modula ML50D permite consolidar los materiales CX y FSA/FSK dentro de Werk 12, considerando capacidad actual, crecimiento esperado, holgura operacional y restricciones estratégicas asociadas a Nordstern 2026.

De forma más específica, el modelo busca responder las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el footprint actual de almacenamiento de CX y FSA/FSK?
2. ¿Cuánta capacidad entrega una unidad Modula ML50D bajo la configuración validada?
3. ¿Qué capacidad total se obtiene al instalar entre uno y cinco módulos?
4. ¿Qué ocurre si se considera crecimiento futuro de 15% a 25%?
5. ¿Qué ocurre si se aplica una tolerancia operacional de 20% sobre la capacidad nominal?
6. ¿Qué configuración permite equilibrar capacidad, utilización, crecimiento, redundancia y viabilidad operacional?

El modelo se utiliza como puente entre el diagnóstico y la evaluación económica. Por una parte, recibe como entrada la situación actual de almacenamiento, los datos de footprint y los requerimientos de crecimiento. Por otra parte, entrega como salida los escenarios de capacidad que luego serán utilizados en la evaluación técnico económica y en el modelo de optimización discreta. En otras palabras, este capítulo establece la factibilidad operacional que debe cumplir cualquier alternativa antes de ser considerada financieramente recomendable.

7.3 Supuestos del modelo

Todo modelo requiere supuestos. En este caso, los supuestos fueron definidos a partir de información levantada en HYDAC, datos SAP, mediciones en terreno, documentación técnica del proveedor y lineamientos asociados a Nordstern 2026. La claridad de estos supuestos es importante porque permite que los resultados sean trazables y defendibles.

Los principales supuestos utilizados son los siguientes:

1. La tecnología base evaluada corresponde al sistema Modula ML50D.
2. Cada unidad Modula ML50D opera con una configuración efectiva de 70 bandejas.
3. Cada bandeja permite almacenar 24 KLT de dimensiones 400 mm por 300 mm.

4. Por lo tanto, cada unidad Modula entrega 1,680 posiciones KLT nominales.
5. El footprint actual de CX corresponde a 562 posiciones en Werk 12b más 150 posiciones en el área 9600.
6. El footprint actual de FSA/FSK corresponde a 377 posiciones asignadas en F009.
7. El crecimiento esperado bajo Nordstern 2026 se analiza en un rango de 15
8. Para evaluar una condición más robusta, se considera una tolerancia operacional de 20
9. Se evalúan escenarios discretos de uno a cinco módulos Modula ML50D.
10. La configuración recomendada debe ser factible tanto en capacidad como en operación, y no solamente desde el punto de vista volumétrico.



Figure 7.2: Módulo de elevación vertical Modula ML50D. Fuente: catálogo Modula.

Estos supuestos permiten estructurar el modelo de forma transparente. La configuración de 70 bandejas por lift no corresponde a una estimación arbitraria, sino a una capacidad operacional conservadora respecto de la capacidad teórica, ya que considera seguridad, tolerancias y flexibilidad futura. Del mismo modo, la tolerancia de 20% evita diseñar un sistema excesivamente ajustado, lo que sería riesgoso en una planta con crecimiento esperado y materiales de alta rotación.

7.4 Definición de unidades de almacenamiento

La unidad base utilizada en el modelo corresponde al KLT, que en este caso se considera como contenedor estándar de 400 mm por 300 mm. Esta decisión permite traducir

las capacidades de los módulos Modula ML50D en una unidad operacional común, comparable con el footprint de los materiales CX y FSA/FSK.

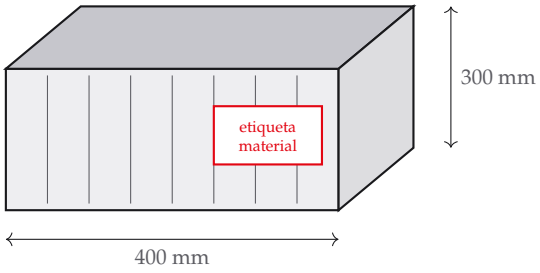


Figure 7.3: Contenedor estándar KLT de 400 × 300 mm: unidad base del modelo de capacidad.

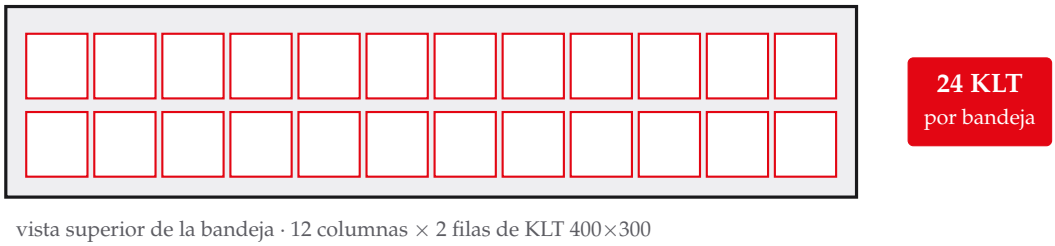


Figure 7.4: Distribución de 24 contenedores KLT sobre una bandeja del Modula ML50D (representación conceptual en vista superior).

La capacidad de una bandeja se define como:

$$KLT_{bandeja} = 24 \tag{7.1}$$

La cantidad efectiva de bandejas por lift se define como:

$$B_{lift} = 70 \tag{7.2}$$

Por lo tanto, la capacidad nominal por unidad Modula ML50D es:

$$K_{lift} = KLT_{bandeja} \cdot B_{lift} \tag{7.3}$$

Sustituyendo los valores:

$$K_{lift} = 24 \cdot 70 = 1,680 \tag{7.4}$$

Así, cada Modula ML50D entrega:

$$K_{lift} = 1,680 \text{ posiciones KLT} \tag{7.5}$$

Este valor se utiliza de manera consistente en el resto del análisis. Es importante destacar que corresponde a una capacidad operacional validada y no simplemente a una capacidad máxima teórica. La diferencia es relevante, porque en proyectos reales no se recomienda trabajar con el límite físico absoluto de una máquina si esto compromete flexibilidad, seguridad o capacidad de adaptación futura.

7.5 Capacidad validada del Modula ML50D

El sistema Modula ML50D fue seleccionado para análisis detallado debido a su ajuste técnico con los requerimientos de Werk 12. En términos de capacidad, el proveedor validó una configuración basada en bandejas internas y contenedores KLT. Aunque la máquina podría presentar una capacidad teórica mayor bajo determinadas condiciones, el proyecto utilizó una configuración efectiva de 70 bandejas por unidad para mantener robustez operacional.

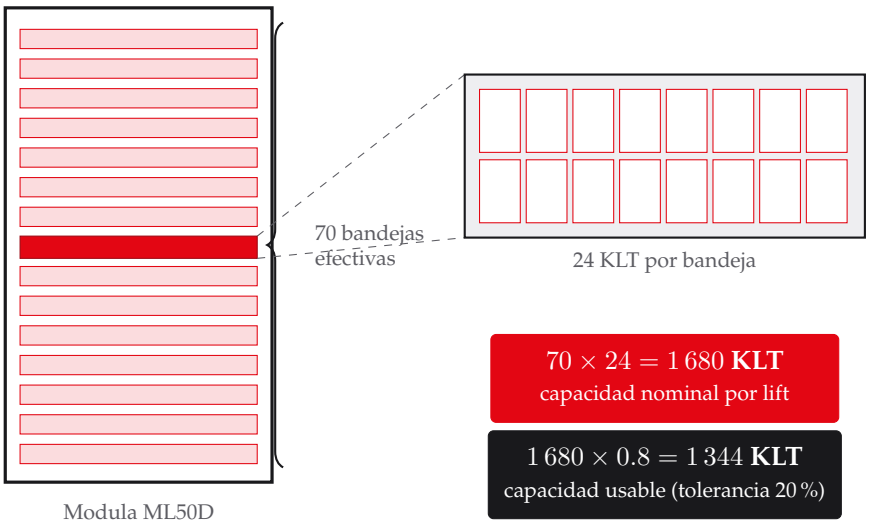


Figure 7.5: Configuración validada del Modula ML50D: 70 bandejas efectivas con 24 KLT cada una entregan 1 680 posiciones nominales por unidad.

La siguiente tabla resume la capacidad considerada para el modelo:

Table 7.1: Capacidad validada por unidad Modula ML50D

Parámetro	Valor
Bandejas efectivas por lift	70
KLT por bandeja	24
Capacidad nominal por lift	1,680 KLT
Tolerancia operacional considerada	20%
Capacidad usable con tolerancia	1,344 KLT

La capacidad usable con tolerancia se calcula como:

$$K_{usable} = K_{lift} \cdot 0.8 \tag{7.6}$$

$$K_{usable} = 1,680 \cdot 0.8 = 1,344 \tag{7.7}$$

Por lo tanto, para una evaluación conservadora, cada unidad se considera capaz de entregar 1,344 posiciones KLT usables. Esta capacidad usable no significa que físicamente el equipo no pueda almacenar más, sino que se reserva un margen para flexibilidad, crecimiento, cambios en la mezcla de materiales, necesidades de mantenimiento, separación de fast movers y reducción de congestión.

7.6 Análisis de capacidad actual

La capacidad requerida por el sistema se construye a partir del footprint actual de CX y FSA/FSK. Este footprint representa las posiciones que actualmente ocupan o requieren estas familias de materiales en las zonas relevantes del análisis.

7.6.a Footprint CX

CX se encuentra distribuido principalmente entre Werk 12b y el área 9600 dentro de Werk 12. En la situación actual, CX cuenta con 562 posiciones activas en Werk 12b y 150 posiciones disponibles en el área 9600. Por lo tanto, el footprint actual de CX es:

$$D_{CX} = 562 + 150 \tag{7.8}$$

$$D_{CX} = 712 \text{ posiciones} \tag{7.9}$$

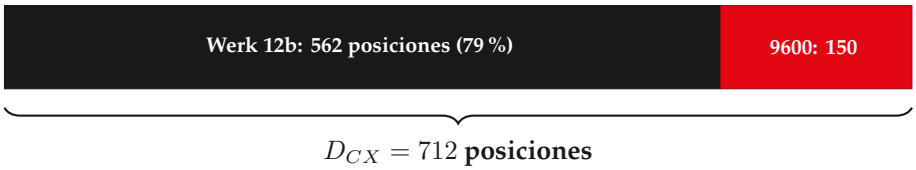


Figure 7.6: Composición del footprint CX: 562 posiciones en Werk 12b y 150 en el área 9600 de Werk 12.

Este valor muestra que CX no se encuentra completamente integrado dentro de Werk 12, sino que depende de una estructura distribuida. Desde el punto de vista de Nordstern 2026, esta condición representa una oportunidad de consolidación.

7.6.b Footprint FSA/FSK

FSA/FSK se analiza principalmente a partir de su presencia en F009. En este almacén auxiliar existen 2,531 posiciones totales, de las cuales 377 están asignadas a FSA/FSK. Por lo tanto, el footprint considerado para FSA/FSK es:

$$D_{FSA/FSK} = 377 \text{ posiciones} \tag{7.10}$$

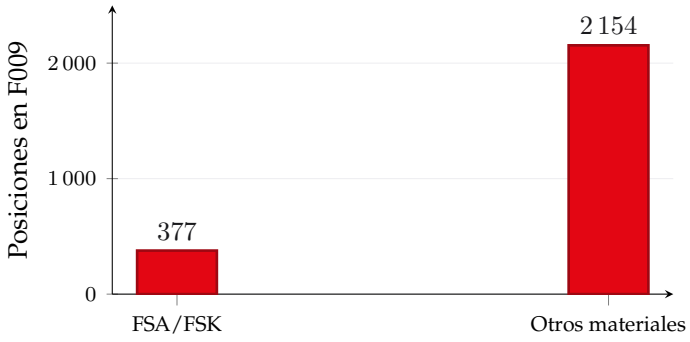


Figure 7.7: Footprint FSA/FSK considerado en el modelo: 377 posiciones asignadas dentro de las 2 531 totales de F009.

Este número debe interpretarse junto con el análisis SAP del capítulo anterior. Aunque el footprint de FSA/FSK no parece extremadamente alto en términos de posiciones, su actividad operacional es muy significativa, especialmente por el volumen de movimientos 261 hacia producción. Por eso, FSA/FSK no puede evaluarse únicamente desde el espacio ocupado, sino también desde su impacto en el flujo.

7.6.c Footprint combinado

El footprint combinado de CX y FSA/FSK se calcula como:

$$D_{base} = D_{CX} + D_{FSA/FSK} \tag{7.11}$$

$$D_{base} = 712 + 377 = 1,089 \tag{7.12}$$

Por lo tanto:

$$D_{base} = 1,089 \text{ posiciones KLT} \tag{7.13}$$

Table 7.2: Footprint base de CX y FSA/FSK

Grupo de materiales	Posiciones consideradas
CX en Werk 12b	562
CX en área 9600	150
Subtotal CX	712
FSA/FSK en F009	377
Footprint combinado	1,089

A primera vista, este requerimiento base es menor que la capacidad nominal de una unidad Modula ML50D, ya que un lift entrega 1,680 posiciones KLT. Sin embargo, esta comparación directa no es suficiente para decidir. La operación futura debe considerar crecimiento, holgura, separación de materiales, throughput, redundancia y reducción real de dependencia de F009. Por ello, el siguiente paso es proyectar la demanda bajo Nordstern 2026.

7.7 Proyección de crecimiento

Nordstern 2026 plantea un escenario de crecimiento para CX y FSA/FSK. En el modelo se considera un rango de crecimiento entre 15% y 25%, lo que permite evaluar la capacidad requerida bajo distintos niveles de presión futura. La demanda futura se calcula como:

$$D_f = D_{base} \cdot (1 + g) \tag{7.14}$$

donde (D_f) corresponde a la demanda futura, (D_{base}) corresponde al footprint actual combinado y (g) representa el crecimiento esperado.

Para un crecimiento de 15%:

$$D_{15\%} = 1,089 \cdot 1.15 = 1,252.35 \tag{7.15}$$

Aproximando:

$$D_{15\%} \approx 1,252 \text{ posiciones KLT} \tag{7.16}$$

Para un crecimiento de 25%:

$$D_{25\%} = 1,089 \cdot 1.25 = 1,361.25 \tag{7.17}$$

Aproximando:

$$D_{25\%} \approx 1,361 \text{ posiciones KLT} \tag{7.18}$$

Table 7.3: Demanda proyectada bajo escenarios de crecimiento Nordstern 2026

Escenario	Factor de crecimiento	Demanda proyectada KLT
Situación base	0%	1,089
Crecimiento moderado	15%	1,252
Crecimiento alto	25%	1,361

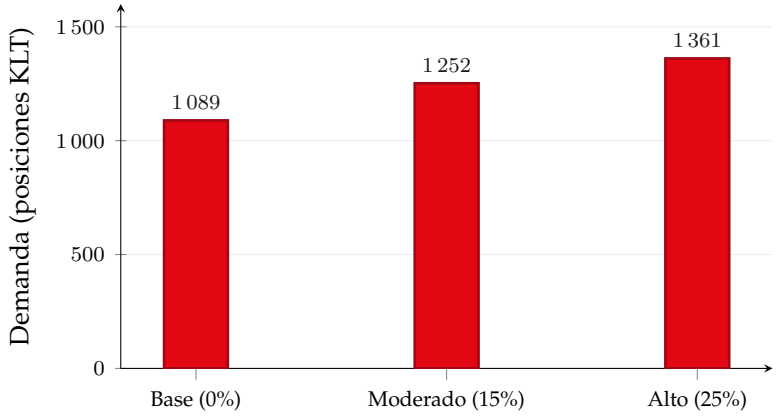


Figure 7.8: Demanda proyectada de posiciones KLT bajo los escenarios de crecimiento Nordstern 2026.

El escenario de 25% se utiliza como referencia conservadora para evaluar capacidad, ya que representa una condición más exigente y alineada con la necesidad de diseñar un sistema robusto. Si una configuración puede responder al crecimiento alto, entonces entrega mayor seguridad para el horizonte Nordstern 2026.

7.8 Escenarios evaluados

Se evaluaron cinco escenarios de instalación, desde una hasta cinco unidades Modula ML50D. Para cada escenario se calcula la capacidad nominal total como:

$$K_{total}(x) = 1,680 \cdot x \tag{7.19}$$

donde (x) representa el número de lifts instalados.

Si se compara esta capacidad nominal con la demanda proyectada de 1,361 posiciones KLT, incluso un lift parece suficiente en términos físicos. Sin embargo, esta conclusión sería demasiado simplificada. En sistemas automatizados, especialmente con materiales

Table 7.4: Capacidad nominal según número de módulos Modula ML50D

Escenario	Número de lifts	Capacidad nominal KLT
Escenario 1	1	1,680
Escenario 2	2	3,360
Escenario 3	3	5,040
Escenario 4	4	6,720
Escenario 5	5	8,400

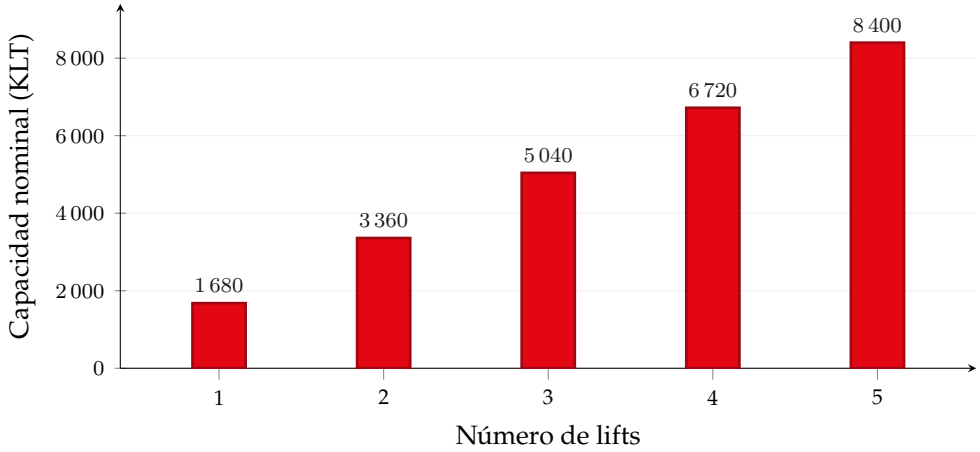


Figure 7.9: Capacidad nominal total según número de módulos Modula ML50D instalados.

de alta rotación, la utilización, throughput y redundancia son factores críticos. Por ello, se analiza también la utilización de cada escenario.

La utilización nominal se define como:

$$U(x) = \frac{D_{25\%}}{K_{total}(x)} \tag{7.20}$$

utilizando ($D_{25\%} = 1,361$).

Table 7.5: Utilización nominal bajo demanda proyectada Nordstern 2026

Escenario	Capacidad nominal KLT	Demanda KLT	Utilización
1 lift	1,680	1,361	81.0%
2 lifts	3,360	1,361	40.5%
3 lifts	5,040	1,361	27.0%
4 lifts	6,720	1,361	20.3%
5 lifts	8,400	1,361	16.2%

El escenario de un lift presenta una utilización nominal de 81%, lo que es alto para una operación que requiere crecimiento, flexibilidad y materiales de alta rotación. Aunque físicamente podría contener la demanda proyectada, dejaría poca holgura para variaciones futuras, separación de fast movers y continuidad operacional. En cambio, tres lifts reducen la utilización nominal a 27%, permitiendo distribuir mejor los materiales, evitar saturación y sostener una operación más estable.

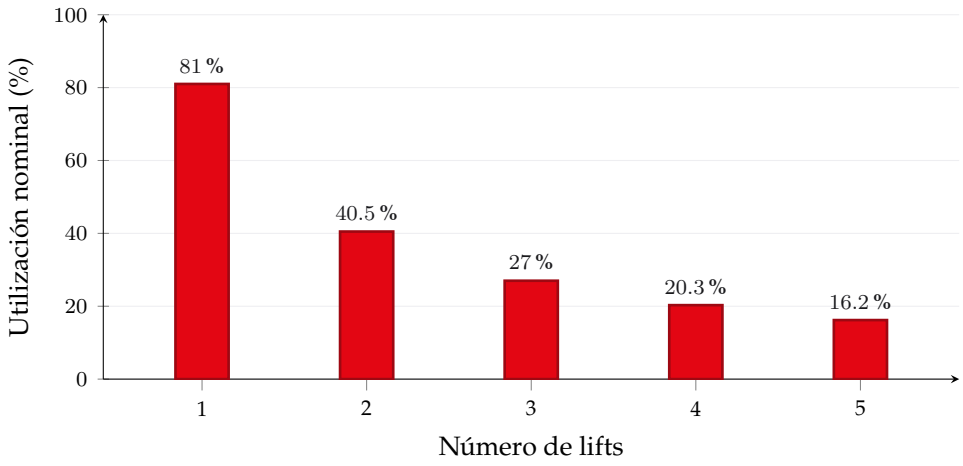


Figure 7.10: Utilización nominal por escenario bajo la demanda proyectada de 1 361 KLT (crecimiento 25 %).

7.9 Escenarios con tolerancia operacional

Para evaluar una condición más robusta, se considera una tolerancia operacional de 20%. Esto equivale a asumir que solo el 80% de la capacidad nominal debe utilizarse como capacidad efectiva. La capacidad usable por lift se calcula como:

$$K_{usable} = 1,680 \cdot 0.8 = 1,344 \tag{7.21}$$

La capacidad usable total para (x) lifts es:

$$K_{usable,total}(x) = 1,344 \cdot x \tag{7.22}$$

Table 7.6: Capacidad usable considerando tolerancia operacional de 20%

Escenario	Capacidad usable KLT	Demanda KLT	Utilización sobre capacidad usable
1 lift	1,344	1,361	101.3%
2 lifts	2,688	1,361	50.6%
3 lifts	4,032	1,361	33.8%
4 lifts	5,376	1,361	25.3%
5 lifts	6,720	1,361	20.2%

Este análisis cambia la interpretación del escenario de un lift. Bajo capacidad usable, una sola unidad queda por encima del 100% de utilización, lo que significa que no cumple la condición conservadora de holgura operacional. En otras palabras, un lift podría ser suficiente desde el punto de vista nominal, pero no desde el punto de vista robusto. Esta diferencia es clave para comprender por qué la solución no podía basarse únicamente en capacidad física.

El escenario de dos lifts entrega una utilización de 50.6% sobre capacidad usable. Esta configuración mejora de forma importante respecto a un lift, pero todavía puede ser limitada si se consideran redundancia, separación de fast movers, picos de consumo y eliminación completa de F009. El escenario de tres lifts entrega una utilización de 33.8%, lo que permite una operación más flexible, con capacidad para distribuir materiales de

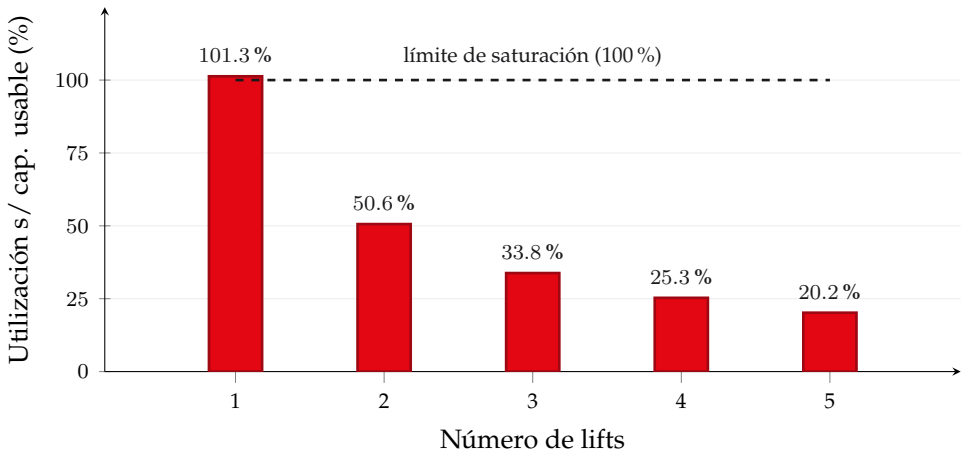


Figure 7.11: Utilización sobre capacidad usable con tolerancia operacional de 20 %: el escenario de un lift supera el 100 % y no cumple el criterio conservador.

alta rotación y absorber crecimiento futuro.

7.10 Capacidad física versus capacidad operacional

Uno de los hallazgos más importantes del modelamiento es que la capacidad física no es equivalente a la capacidad operacional. La capacidad física responde a la pregunta de cuántas posiciones caben dentro del sistema. La capacidad operacional responde a si el sistema puede trabajar de forma estable, rápida y segura bajo la demanda real de la planta. En este caso, un lift puede parecer suficiente si solo se observa el footprint base o incluso la demanda proyectada con crecimiento. Sin embargo, presenta varias limitaciones operacionales:

1. Concentra demasiados materiales en una sola unidad.
2. Genera riesgo de cuello de botella, porque solo una bandeja puede presentarse por vez.
3. No entrega redundancia ante fallas, mantenimiento o picos de demanda.
4. Dificulta la separación de materiales de alta rotación.
5. No permite una reducción robusta de dependencia de F009.
6. Deja poca holgura para cambios en mix de productos o crecimiento superior al esperado.

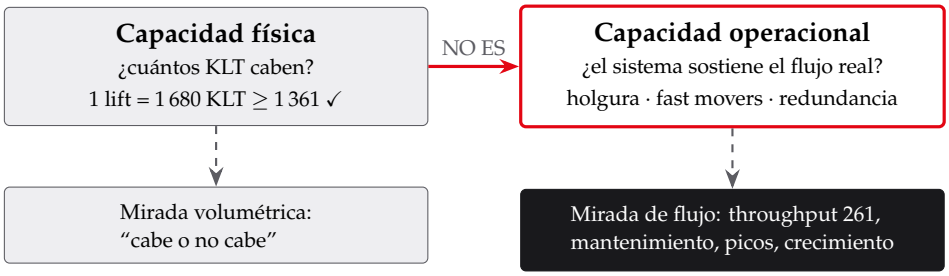


Figure 7.12: Distinción entre capacidad física y capacidad operacional: una configuración puede contener la demanda y aun así no sostener el flujo real de la planta.

Por esta razón, el modelo no recomienda evaluar la solución solamente con una lógica de "cabe o no cabe". En logística industrial, especialmente cuando existen altos movimientos 261 hacia producción, lo relevante es que el sistema pueda sostener el flujo. Un sistema saturado puede generar esperas, congestión y pérdida de flexibilidad, incluso si la capacidad nominal parece suficiente.

7.11 Fast movers y distribución operacional

El análisis SAP mostró que una parte importante de la carga operacional proviene de movimientos 261, especialmente en FSA/FSK y también en CX. Esto significa que la solución futura debe considerar materiales de alta rotación, conocidos como fast movers. Estos materiales requieren acceso frecuente y no deberían concentrarse en una sola unidad si se busca mantener un flujo estable.

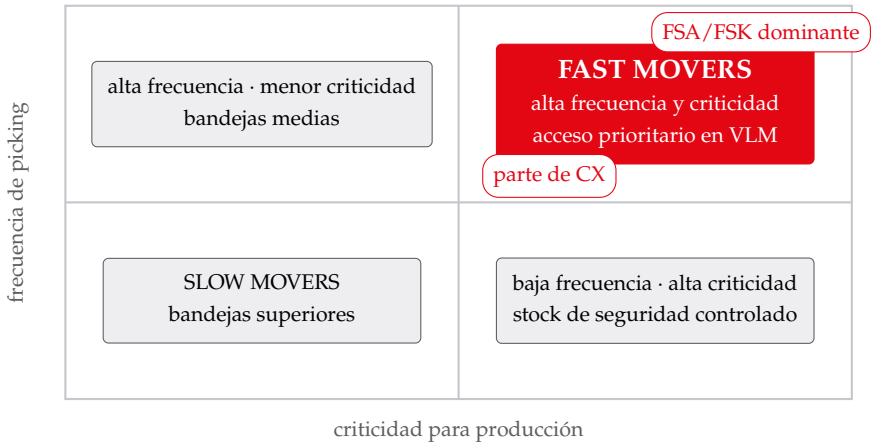


Figure 7.13: Matriz de clasificación fast movers / slow movers aplicada a CX y FSA/FSK: la posición de cada material define su prioridad de acceso dentro de los módulos.

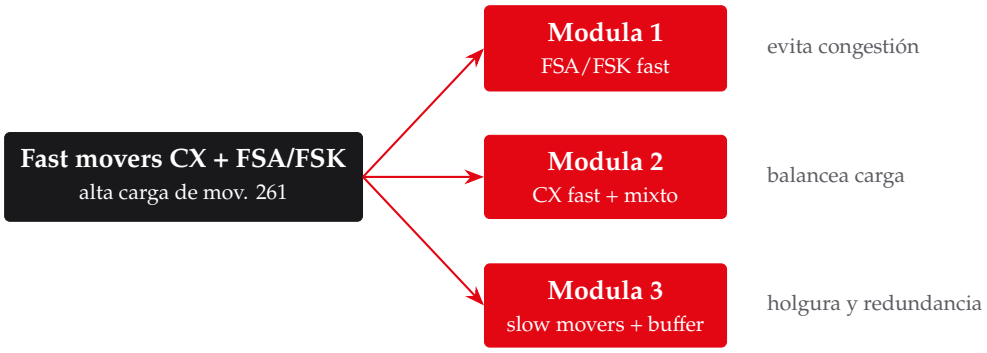


Figure 7.14: Distribución conceptual de materiales entre tres lifts: separar los fast movers reduce congestión, balancea el picking y entrega redundancia operacional.

La distribución de fast movers entre múltiples módulos permite:

1. Reducir congestión en una sola estación de picking.
2. Balancear la carga de trabajo entre equipos.
3. Mejorar tiempos de respuesta ante consumo de producción.

4. Mantener operación parcial si un equipo requiere mantenimiento.
5. Separar familias o categorías de materiales según frecuencia y criticidad.

Bajo esta lógica, tres lifts ofrecen una ventaja operacional relevante. Permiten distribuir los materiales de mayor rotación, separar CX y FSA/FSK de forma más ordenada y reducir la probabilidad de cuellos de botella. Además, entregan una arquitectura más compatible con SAP EWM, ya que cada módulo puede representar una estructura más clara de ubicaciones y tareas.

7.12 Evaluación cualitativa de escenarios

Además del cálculo de capacidad, se realizó una interpretación cualitativa de cada escenario. Esta interpretación permite conectar los resultados numéricos con la realidad operacional.

7.12.a Escenario 1: un lift

El escenario de un lift presenta una capacidad nominal de 1,680 KLT, lo que podría parecer suficiente al compararse con la demanda proyectada de 1,361 KLT. Sin embargo, al aplicar la tolerancia operacional de 20%, la capacidad usable baja a 1,344 KLT, quedando por debajo de la demanda proyectada. Esto implica una utilización superior al 100% bajo el criterio conservador.

Desde el punto de vista operacional, un lift representa un riesgo alto. No permite distribuir adecuadamente fast movers, no entrega redundancia y puede transformarse en un cuello de botella para movimientos 261. Por ello, aunque financieramente pueda ser atractivo, no se considera una configuración robusta para Nordstern 2026.

7.12.b Escenario 2: dos lifts

El escenario de dos lifts entrega 3,360 KLT nominales y 2,688 KLT usables. Esto permite absorber la demanda proyectada y mejora considerablemente la utilización. Además, entrega cierta capacidad de distribución entre equipos y reduce el riesgo de concentración.

Sin embargo, dos lifts todavía pueden ser insuficientes para una consolidación completa bajo criterios estratégicos. La operación debe considerar picos de demanda, separación de familias, redundancia, crecimiento futuro y eliminación de F009. Por ello, este escenario representa una mejora fuerte, pero no necesariamente la solución más robusta.

7.12.c Escenario 3: tres lifts

El escenario de tres lifts entrega 5,040 KLT nominales y 4,032 KLT usables. Esta configuración permite absorber la demanda actual y futura con holgura, distribuir fast movers, reducir dependencia de F009 y sostener una operación más estable. Además, entrega redundancia y flexibilidad frente a cambios en el mix de materiales.

Desde el punto de vista de capacidad, tres lifts representan el punto donde la solución deja de ser solamente suficiente y pasa a ser operacionalmente robusta. Esta configuración permite cumplir con el objetivo de consolidación sin caer en una utilización excesiva ni en una sobrecapacidad innecesaria.

7.12.d Escenario 4: cuatro lifts

El escenario de cuatro lifts entrega 6,720 KLT nominales y 5,376 KLT usables. Aunque esta capacidad es mayor, el beneficio operacional adicional frente a tres lifts comienza a reducirse. La cuarta unidad aporta holgura y redundancia, pero no necesariamente resuelve un problema crítico adicional bajo el horizonte Nordstern 2026.

Por esta razón, cuatro lifts pueden interpretarse como una configuración de confort o expansión futura, pero no como la alternativa más eficiente para el problema actual. Esta conclusión será reforzada en los capítulos de evaluación económica y optimización, donde se observa que los beneficios marginales disminuyen.

7.12.e Escenario 5: cinco lifts

El escenario de cinco lifts entrega 8,400 KLT nominales y 6,720 KLT usables. Esta configuración genera una holgura muy alta respecto de la demanda proyectada. Si bien podría ofrecer máxima flexibilidad, también aumenta el riesgo de sobredimensionamiento, mayor CAPEX y menor eficiencia marginal.

Desde el punto de vista del modelamiento de capacidad, cinco lifts no son necesarios para consolidar CX y FSA/FSK bajo las condiciones analizadas. Su justificación solo sería razonable si HYDAC anticipara un crecimiento extraordinario, nuevas familias de materiales o una estrategia de automatización mucho más amplia que la considerada en esta memoria.

Table 7.7: Interpretación operacional de escenarios de capacidad

Escenario	Evaluación de capacidad	Interpretación operacional
1 lift	Insuficiente con tolerancia	Alto riesgo de saturación y cuello de botella
2 lifts	Suficiente físicamente	Mejora relevante, pero menor robustez estratégica
3 lifts	Robusto y equilibrado	Mejor balance entre capacidad, holgura y operación
4 lifts	Alta holgura	Beneficio adicional limitado frente al CAPEX
5 lifts	Sobrecapacidad	Riesgo de sobredimensionamiento bajo el horizonte analizado

7.13 Resultados del modelamiento

Los resultados del modelamiento muestran que la configuración de tres Modula ML50D representa la alternativa más equilibrada desde el punto de vista de capacidad operacional. Aunque un lift puede parecer suficiente al observar solamente la demanda nominal, no cumple adecuadamente al considerar tolerancia operacional, crecimiento, fast movers y redundancia. Dos lifts mejoran considerablemente la situación, pero todavía presentan limitaciones frente a la consolidación total y la reducción robusta de F009. Tres lifts entregan una capacidad usable de 4,032 KLT, suficiente para absorber la demanda proyectada con holgura y permitir una operación más estable.

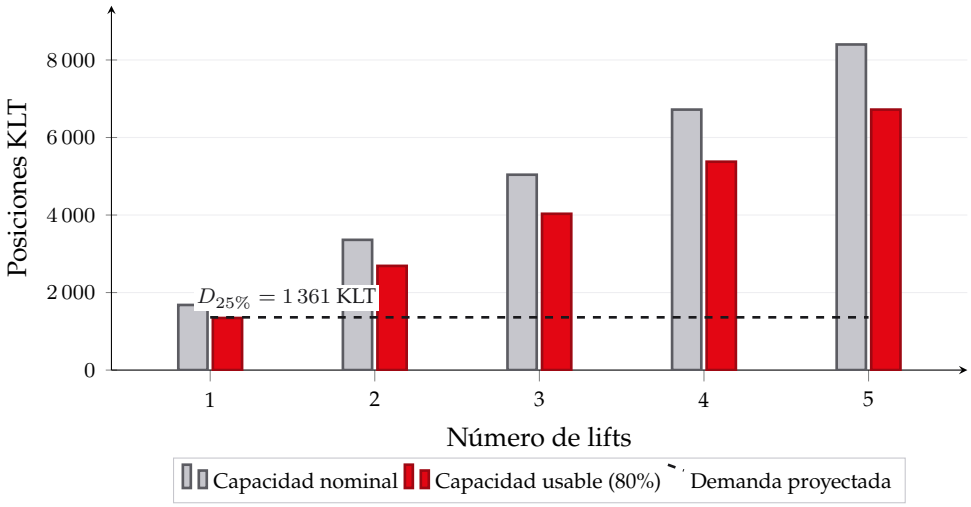


Figure 7.15: Comparación final del modelo: demanda proyectada frente a capacidad nominal y usable por escenario; un lift queda bajo la demanda en capacidad usable.

Los principales resultados son:

1. La demanda base combinada de CX y FSA/FSK es de 1,089 posiciones.
2. Con crecimiento de 25%, la demanda proyectada alcanza aproximadamente 1,361 posiciones.
3. Cada Modula ML50D entrega 1,680 posiciones nominales y 1,344 posiciones usables con tolerancia de 20
4. Un lift es suficiente solo en términos nominales, pero no bajo capacidad usable.
5. Dos lifts entregan capacidad suficiente, pero menor robustez operacional.
6. Tres lifts entregan el mejor equilibrio entre capacidad, holgura, distribución de fast movers, redundancia y alineación estratégica.
7. Cuatro y cinco lifts generan capacidad adicional, pero con riesgo de sobredimensionamiento bajo el horizonte analizado.

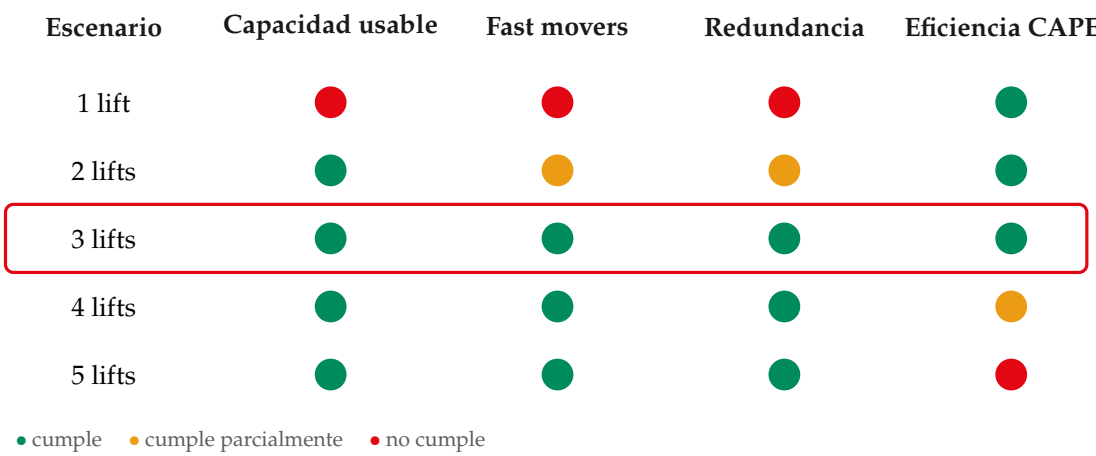


Figure 7.16: Semáforo de factibilidad operacional por escenario: tres lifts es la primera configuración que cumple todos los criterios simultáneamente.

7.14 Relación con Nordstern 2026

El modelamiento de capacidad se relaciona directamente con Nordstern 2026. La visión estratégica de HYDAC no busca únicamente resolver una falta de espacio puntual, sino construir un sistema logístico más moderno, consolidado, digital e integrado con SAP EWM. Bajo esta mirada, la configuración de capacidad debe permitir:

1. Consolidar CX dentro de Werk 12.
2. Reducir o eliminar la dependencia de F009 para FSA/FSK.
3. Aumentar densidad de almacenamiento.
4. Sostener crecimiento futuro.
5. Reducir movimientos internos y recorridos innecesarios.
6. Mejorar ergonomía y estabilidad operacional.
7. Preparar la estructura física para integración digital.

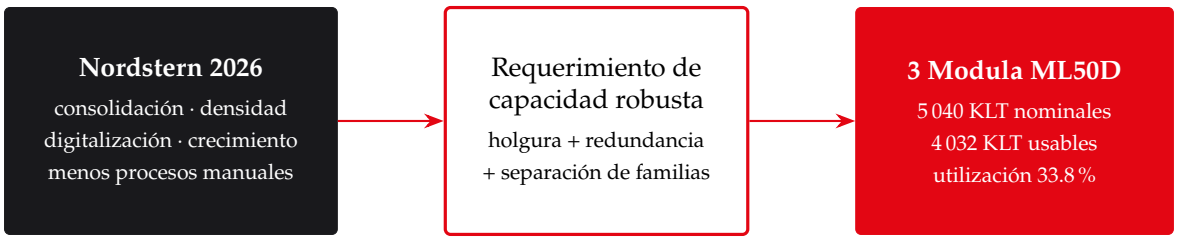


Figure 7.17: La visión Nordstern 2026 exige capacidad operacionalmente robusta, condición que se satisface con la configuración de tres módulos.

Tres lifts permiten responder mejor a esta visión porque no solo entregan capacidad, sino que crean una arquitectura operacional más robusta. Esta configuración permite separar familias de materiales, distribuir carga de picking, dejar espacio para crecimiento, disminuir la dependencia de almacenes auxiliares y construir una base física compatible con SAP EWM.

En este sentido, la decisión de tres lifts no debe interpretarse como una simple elección de capacidad. Debe entenderse como una decisión estratégica de diseño intralogístico. El modelo muestra que la solución recomendada no es la mínima físicamente posible, sino la configuración que mejor equilibra suficiencia, robustez y preparación futura.

7.15 Síntesis del capítulo

El modelamiento de capacidad permitió demostrar que la decisión sobre el número de módulos Modula ML50D no podía basarse únicamente en el volumen de posiciones requeridas. Si bien el footprint base de CX y FSA/FSK es de 1,089 posiciones y la demanda proyectada con crecimiento de 25% alcanza aproximadamente 1,361 posiciones, la operación real exige considerar capacidad usable, tolerancia, fast movers, redundancia y estabilidad del flujo hacia producción.

La capacidad validada de cada Modula ML50D corresponde a 1,680 posiciones KLT nominales, o 1,344 posiciones KLT usables considerando una tolerancia operacional de

20%. Bajo esta condición, una sola unidad no alcanza a cubrir de forma robusta la demanda proyectada. Dos unidades entregan capacidad suficiente, pero no necesariamente cumplen todos los requerimientos estratégicos y operacionales. Tres unidades, en cambio, entregan 5,040 posiciones nominales y 4,032 posiciones usables, lo que permite consolidar materiales, reducir dependencia de F009, distribuir fast movers y sostener crecimiento futuro.



Figure 7.18: Síntesis del modelamiento de capacidad: tres Modula ML50D equilibran suficiencia, holgura y robustez operacional.

Por lo tanto, desde la perspectiva de capacidad, tres Modula ML50D representan la configuración recomendada. Esta conclusión será evaluada en los capítulos siguientes desde una perspectiva tecnológica, económica y matemática, con el fin de confirmar si la alternativa también es conveniente desde el punto de vista técnico, financiero y de optimización discreta.

8 Evaluación de Alternativas

8.1 Introducción a la evaluación de alternativas

La evaluación de alternativas corresponde a la etapa en que el diagnóstico del sistema actual y el modelamiento de capacidad se transforman en una decisión tecnológica concreta. Hasta este punto de la memoria se ha mostrado que HYDAC Werk 12 enfrentaba una combinación de restricciones de capacidad, dispersión de materiales, dependencia de F009, alto volumen de movimientos hacia producción y necesidad de integración futura con SAP EWM. Sin embargo, reconocer el problema no era suficiente. Era necesario estudiar qué tipo de solución podía responder mejor a esas condiciones y cuál alternativa entregaba el mejor equilibrio entre capacidad, operación, integración digital, costo y alineación estratégica con Nordstern 2026.

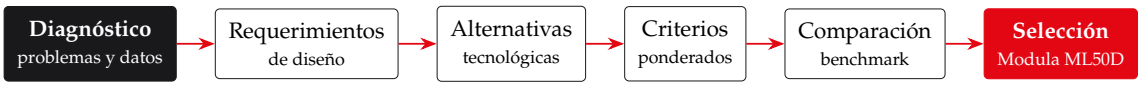


Figure 8.1: Proceso de evaluación de alternativas: desde el diagnóstico y los requerimientos de diseño hasta la selección tecnológica.

La evaluación no comenzó suponiendo que Modula ML50D era automáticamente la mejor respuesta. De hecho, el proyecto consideró distintas familias de soluciones, desde alternativas tradicionales, como racks o expansión de almacenamiento, hasta tecnologías automatizadas, como Vertical Lift Modules, shuttle systems y sistemas AS/RS. Además, dentro de los VLM se revisaron proveedores específicos, incluyendo Modula, Kardex, Hänel y SSI Schäfer. Esta comparación fue importante porque permitió evitar una recomendación basada solo en intuición o preferencia previa, y permitió construir una justificación más sólida para la solución finalmente seleccionada.

La decisión debía responder a una pregunta central: qué alternativa permite consolidar CX y FSA/FSK dentro de Werk 12, reducir dependencia de F009, sostener crecimiento futuro, mejorar eficiencia operacional y prepararse para SAP EWM, sin generar una inversión sobredimensionada o una solución difícil de implementar. En otras palabras, no se buscaba la tecnología más avanzada en términos absolutos, sino la tecnología más adecuada para el contexto específico de HYDAC Werk 12.

8.2 Requerimientos de diseño

Antes de comparar alternativas, fue necesario establecer los requerimientos que debía cumplir la solución. Estos requerimientos se derivaron del diagnóstico, del análisis SAP, del modelamiento de capacidad y del marco estratégico Nordstern 2026. La alternativa seleccionada debía responder simultáneamente a restricciones físicas, operacionales, económicas y digitales.

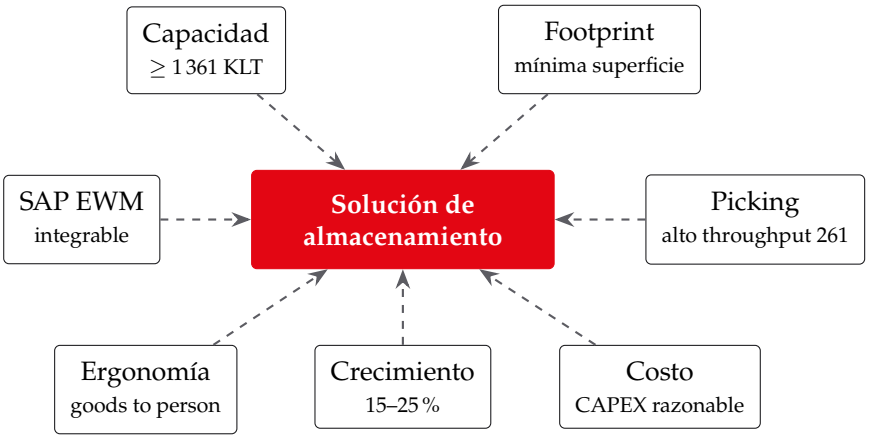


Figure 8.2: Requerimientos de diseño derivados del diagnóstico y del marco Nordstern 2026 que debe cumplir la alternativa seleccionada.

Los principales requerimientos considerados fueron los siguientes:

1. Aumentar la densidad de almacenamiento dentro de Werk 12.
2. Permitir la consolidación de materiales CX actualmente ubicados en Werk 12b.
3. Reducir o eliminar la dependencia de F009 para materiales FSA/FSK.
4. Sostener el crecimiento proyectado bajo Nordstern 2026.
5. Mejorar el rendimiento de picking asociado a movimientos 261.
6. Reducir movimientos internos 315 vinculados a relocalizaciones.
7. Disminuir recorridos y tiempos de búsqueda de operadores.
8. Mejorar condiciones ergonómicas de picking.
9. Ser compatible con una futura integración SAP EWM.
10. Ajustarse físicamente al layout y altura disponible de Werk 12.
11. Presentar una inversión justificable mediante ahorros operacionales y financieros.
12. Mantener flexibilidad ante cambios futuros en mix de productos.

Estos requerimientos muestran que la evaluación de alternativas no podía limitarse a comparar capacidad nominal. Una solución con alta capacidad pero baja integración digital podía no ser adecuada. Una solución económica pero con baja ergonomía o poca escalabilidad tampoco resolvía el problema. Del mismo modo, una solución muy automatizada pero costosa y sobredimensionada podía ser técnicamente atractiva, pero económicamente menos conveniente.

Table 8.1: Requerimientos principales para la solución de almacenamiento

Dimensión	Requerimiento
Capacidad	Absorber CX y FSA/FSK actuales, considerando crecimiento futuro
Operación	Mejorar picking, reducir recorridos y disminuir relocalizaciones internas
Espacio físico	Aumentar densidad y ajustarse al layout disponible en Werk 12
Digitalización	Ser compatible con SAP EWM y procesos paperless
Ergonomía	Reducir esfuerzo físico y mejorar condiciones de trabajo
Economía	Presentar ahorros suficientes para justificar la inversión
Estrategia	Alinearse con Nordstern 2026 y la consolidación logística futura

8.3 Identificación de alternativas

La identificación de alternativas consideró soluciones de distinta naturaleza. Algunas alternativas correspondían a mejoras tradicionales del sistema actual, mientras que otras implicaban un cambio tecnológico mayor. Esta amplitud fue necesaria porque, al inicio del proyecto, HYDAC no necesitaba únicamente validar una máquina específica, sino comprender qué tipo de arquitectura intralogística era más adecuada para su situación.

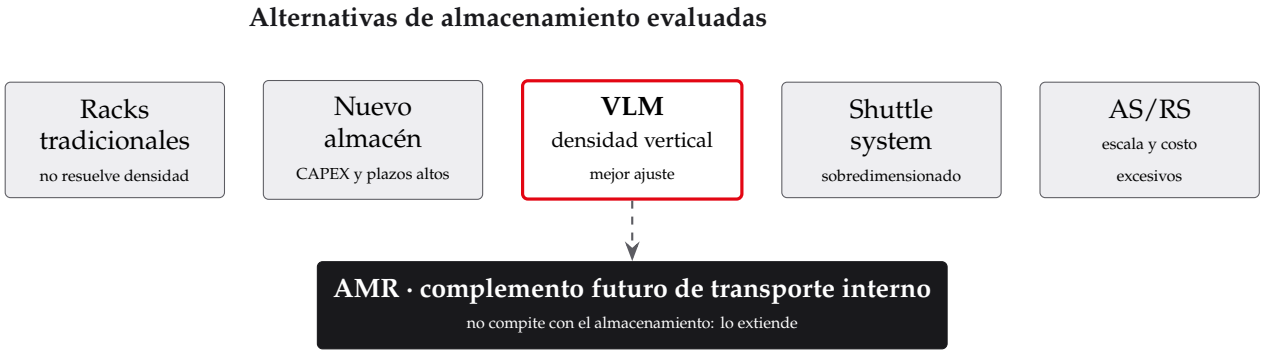


Figure 8.3: Mapa de alternativas evaluadas: el VLM presenta el mejor ajuste a los requerimientos, con los AMR como capa complementaria futura.

8.3.a Racks tradicionales

La primera alternativa corresponde a continuar o expandir el uso de racks tradicionales. Esta solución tiene como ventaja principal su bajo nivel de complejidad tecnológica, su facilidad de comprensión por parte de operadores y su menor inversión inicial en comparación con sistemas automatizados. Además, no requiere una transformación profunda de los procesos digitales o de integración.

Sin embargo, esta alternativa presenta limitaciones importantes para el caso de Werk 12. Los racks tradicionales ocupan mayor superficie, mantienen la lógica de operador hacia material, no reducen de forma significativa los recorridos, no resuelven completamente

los problemas ergonómicos y tienen menor capacidad para integrarse con una visión SAP EWM más automatizada. Además, si el problema de fondo es la falta de densidad y la dispersión entre Werk 12b, 9600 y F009, agregar más racks puede aliviar parcialmente la capacidad, pero no transforma estructuralmente el sistema.

Por esta razón, los racks tradicionales fueron considerados como una alternativa de baja complejidad, pero insuficiente para responder a Nordstern 2026. Podrían funcionar como solución temporal o complementaria, pero no como arquitectura principal de modernización.

8.3.b Nuevo almacén o expansión física

Otra alternativa posible era aumentar capacidad mediante una expansión física o mediante el uso de un nuevo almacén. Esta opción permite incrementar espacio disponible y puede ser útil cuando la restricción principal es puramente volumétrica. Sin embargo, en el caso de HYDAC Werk 12, el problema no era solamente falta de espacio, sino dispersión, recorridos, relocalizaciones internas, integración digital y necesidad de mayor densidad.

Construir o habilitar más espacio puede incluso amplificar algunos problemas si los materiales quedan más lejos de los puntos de consumo. Una expansión física puede entregar capacidad adicional, pero no necesariamente reduce movimientos 315 ni mejora el flujo 261 hacia producción. Además, involucra costos de infraestructura, tiempos de implementación y posibles restricciones de disponibilidad de terreno o layout.

En consecuencia, la expansión física fue considerada como una alternativa de alta inversión y menor alineación con la idea de compactar y digitalizar la operación. En vez de aumentar superficie, el proyecto buscaba utilizar mejor el espacio disponible dentro de Werk 12.

8.3.c Vertical Lift Modules

Los Vertical Lift Modules, o VLM, aparecieron como una alternativa especialmente interesante porque responden directamente a varios requerimientos del proyecto. Estos sistemas permiten aumentar densidad de almacenamiento utilizando la altura del edificio, reducir superficie ocupada, mejorar ergonomía, acercar el material al operador y facilitar la integración con sistemas de gestión de almacén.

En el caso de HYDAC, los VLM ofrecían una ventaja clara frente a racks tradicionales y expansión física: permitían consolidar materiales dentro de Werk 12 sin requerir una superficie proporcionalmente mayor. Además, su lógica de operación goods to person, es decir, material hacia la persona, permitía reducir recorridos de operadores y mejorar condiciones ergonómicas.

Los VLM también se alineaban con Nordstern 2026 por su potencial de integración con SAP EWM. Esto era especialmente importante porque la empresa buscaba avanzar hacia procesos más digitales, trazables y sin papel. Por lo tanto, los VLM no solo entregaban capacidad, sino también una base física para una operación más automatizada y controlada.

8.3.d Shuttle systems

Los shuttle systems corresponden a sistemas automatizados donde carros o vehículos internos se desplazan dentro de una estructura de almacenamiento para mover contenedores o pallets. Estos sistemas pueden ofrecer alto rendimiento en operaciones de gran volumen, especialmente cuando existen flujos muy repetitivos y alto nivel de automatización.

Sin embargo, para el caso de Werk 12, esta alternativa presentaba desafíos. Los shuttle systems suelen requerir infraestructura más compleja, mayor inversión inicial, diseño más específico y una integración más exigente con el layout. Además, pueden ser más adecuados para centros de distribución o almacenes de mayor escala y alta estandarización, mientras que el caso analizado requería una solución compacta, flexible y viable dentro de una planta existente.

Por esta razón, los shuttle systems fueron considerados como una alternativa tecnológicamente robusta, pero menos adecuada para el alcance inmediato del proyecto. Su complejidad y posible sobredimensionamiento los hacían menos atractivos frente a una solución VLM.

8.3.e AS/RS

Los sistemas AS/RS, Automated Storage and Retrieval Systems, corresponden a almacenes automatizados de almacenamiento y recuperación. Pueden ofrecer alta capacidad, precisión y automatización, especialmente en operaciones de gran escala. Sin embargo, al igual que los shuttle systems, suelen requerir mayor infraestructura, mayor inversión y una planificación más amplia de implementación.

En el contexto de HYDAC Werk 12, un AS/RS podía ser una alternativa conceptualmente interesante, pero no necesariamente la más ajustada al problema. La necesidad era consolidar CX y FSA/FSK dentro de una planta existente, con restricciones de espacio, integración futura con SAP EWM y necesidad de resultados defendibles en un horizonte de inversión razonable. Un AS/RS completo podía superar el nivel de automatización requerido para el alcance del proyecto y generar una solución más rígida o costosa.

8.3.f AMR como complemento de transporte interno

Aunque el foco principal de este capítulo es la evaluación de almacenamiento, también se consideró la automatización del transporte interno mediante AMR como complemento futuro. Los AMR no resuelven por sí solos la capacidad de almacenamiento, pero pueden apoyar el flujo entre los módulos verticales y las estaciones de trabajo, transportando materiales o retornando cajas vacías.

Por esta razón, los AMR fueron evaluados como una capa posterior dentro de la arquitectura intralogística. Primero era necesario definir el núcleo de almacenamiento automatizado, y luego analizar cómo mover materiales desde ese núcleo hacia producción. Esta lógica permitió separar la decisión principal, relacionada con VLM, de una decisión complementaria, relacionada con transporte interno.

8.4 Benchmark tecnológico

El benchmark tecnológico permitió comparar las alternativas disponibles según criterios comunes. Esta etapa fue relevante porque permitió ordenar la discusión y evitar que la decisión dependiera únicamente de una impresión general. Los criterios utilizados fueron capacidad, footprint, integración SAP EWM, ergonomía, flexibilidad, complejidad de implementación, escalabilidad y ajuste estratégico.

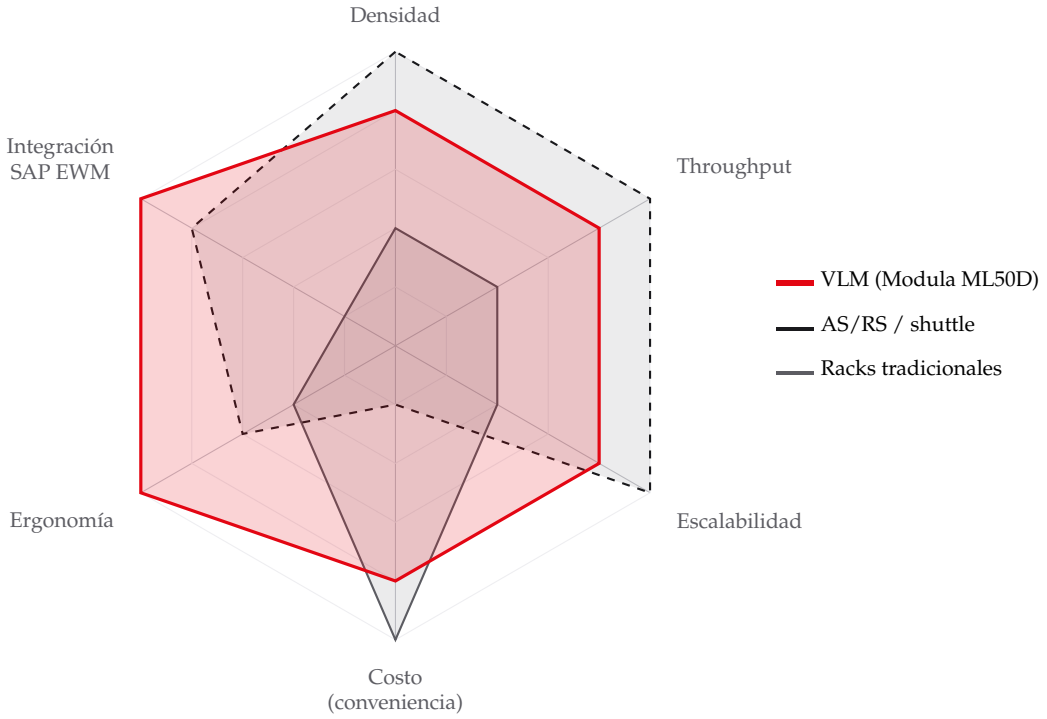


Figure 8.4: Comparación cualitativa de alternativas mediante radar (escala 1–5): el VLM equilibra densidad, integración, ergonomía y costo para la escala de Werk 12.

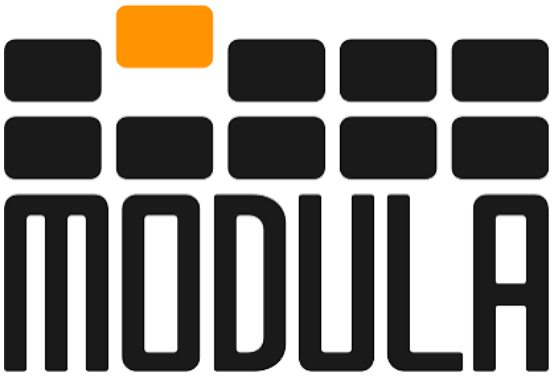
Table 8.2: Comparación cualitativa de alternativas de almacenamiento

Alternativa	Densidad	Integración digital	Ergonomía	Complejidad	Ajuste Werk 12
Racks tradicionales	Baja	Baja	Media baja	Baja	Parcial
Nuevo almacén	Media	Media	Media	Alta	Parcial
VLM	**Alta**	**Alta**	**Alta**	**Media**	**Alto**
Shuttle system	Alta	Alta	Alta	Alta	Medio
AS/RS	Muy alta	Alta	Alta	Muy alta	Medio bajo

La comparación muestra que los VLM presentan una combinación especialmente equilibrada para el caso estudiado. No son la alternativa más simple, como los racks, ni la más compleja, como un AS/RS completo. Entregan alta densidad, buena ergonomía, integración digital y una complejidad de implementación razonable para una planta existente. Esta combinación fue determinante para profundizar la evaluación de proveedores VLM.

8.5 Proveedores VLM considerados

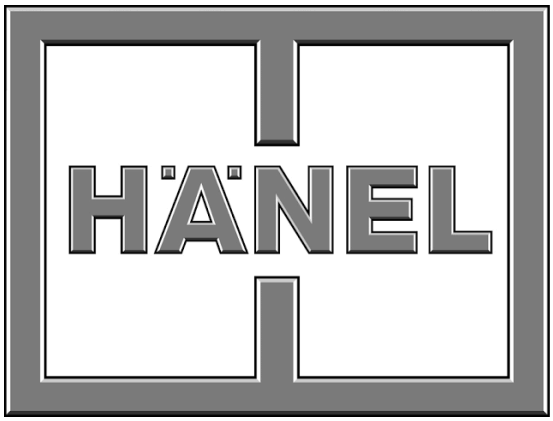
Dentro de las soluciones VLM se revisaron distintos proveedores. Los principales proveedores considerados fueron Modula, Kardex, Hänel y SSI Schäfer. Cada uno ofrece soluciones de almacenamiento automatizado con distintas configuraciones, capacidades, dimensiones, niveles de integración y soporte. La comparación entre proveedores permitió identificar cuál se ajustaba mejor al contexto de Werk 12.



(a) Modula.



(b) Kardex.



(c) Hänel.



(d) SSI Schäfer.

Figure 8.5: Principales empresas proveedoras de soluciones automatizadas de almacenamiento vertical consideradas durante el análisis de mercado y el proceso de comparación tecnológica: Modula, Kardex, Hänel y SSI Schäfer. Fuente: elaboración propia a partir de material gráfico publicado en los sitios corporativos de Modula, Kardex, Hänel y SSI Schäfer.

8.6 Comparación técnica de proveedores de almacenamiento vertical

Con el fin de sustentar la selección tecnológica sobre una base objetiva, se analizaron en detalle cuatro proveedores internacionales de módulos verticales de almacenamiento (VLM): Modula, Kardex, Hänel y SSI Schäfer. Para cada uno se identificó el modelo más comparable con los requerimientos de Werk 12 y se revisaron sus características técnicas, su compatibilidad con las cajas KLT, su capacidad de integración con SAP EWM y su adecuación al caso CX y FSA/FSK.

8.6.a Modula

Modula es una empresa italiana especializada en el diseño y fabricación de sistemas automáticos de almacenamiento vertical y horizontal. La compañía desarrolla soluciones de intralogística orientadas a aumentar la densidad de almacenamiento, reducir los recorridos de los operadores y mejorar el control digital del inventario. Sus sistemas se utilizan en sectores como automoción, fabricación de maquinaria, electrónica, distribución, repuestos y producción industrial.

El principio de funcionamiento de un almacén vertical Modula se basa en el concepto *goods-to-person*. Las bandejas se almacenan automáticamente en dos columnas verticales y son transportadas por un extractor central hasta una abertura de servicio situada a una altura ergonómica. De este modo, el operador no necesita desplazarse físicamente por los pasillos para localizar los materiales, sino que el sistema presenta automáticamente la bandeja requerida.

Para el proyecto de HYDAC Werk 12 se analizó específicamente el modelo **Modula ML50D**. Este modelo fue considerado especialmente adecuado para el almacenamiento de componentes CX y FSA/FSK en cajas KLT de $400 \times 300\,\text{mm}$.

Las principales características técnicas consideradas fueron:

- **Modelo evaluado:** Modula ML50D.
- **Dimensiones de bandeja:** $4100 \times 857\,\text{mm}$.
- **Carga máxima por bandeja:** hasta $500\,\text{kg}$, distribuida uniformemente.
- **Número de bandejas de la configuración evaluada:** 70 bandejas por unidad.
- **Tipo de contenedor principal:** KLT de $400 \times 300\,\text{mm}$.
- **Capacidad nominal por bandeja:** 24 posiciones KLT.
- **Capacidad nominal por elevador:** $70 \times 24 = 1{,}680$ posiciones KLT.
- **Tolerancia operacional:** se considera una reserva del $20\,\%$ para evitar utilizar la capacidad física completa.
- **Capacidad utilizable por elevador:** $1{,}680 \times 0.80 = 1{,}344$ posiciones KLT utilizables.
- **Configuración vertical:** posición de bandejas adaptable a las alturas reales de los materiales.
- **Aplicación prevista:** almacenamiento centralizado de materiales CX y FSA/FSK en Werk 12.

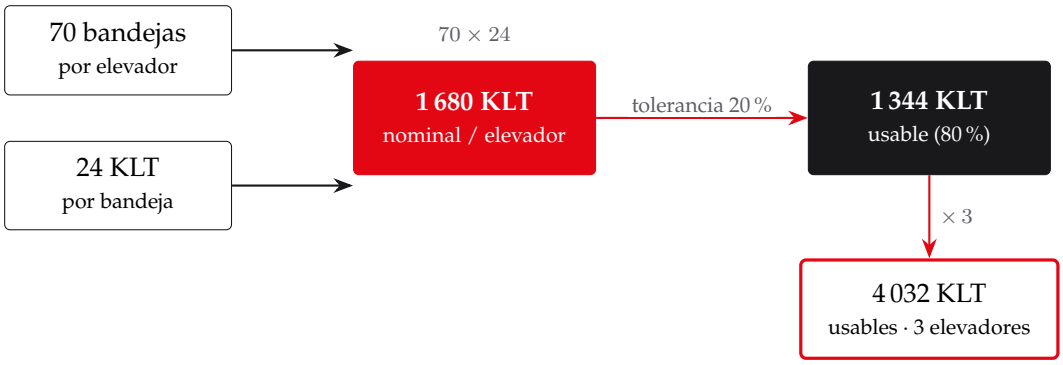


Figure 8.6: Cálculo de capacidad del Modula ML50D: 70 bandejas de 24 KLT entregan 1 680 posiciones nominales por elevador, equivalentes a 1 344 usables tras la tolerancia del 20 %, y a 4 032 usables para la configuración de tres unidades.

La reserva del 20 % constituye un criterio importante para la evaluación. La capacidad nominal de $1{,}680$ posiciones representa el máximo geométrico teórico, pero no debe interpretarse como la capacidad que puede utilizarse permanentemente durante la operación. La capacidad efectiva de $1{,}344$ posiciones por unidad permite mantener espacios disponibles para:

- variaciones en la altura y geometría de las cajas;
- redistribución de materiales entre bandejas;
- incorporación de nuevos números de material;
- cambios temporales en el inventario;
- separación de familias de productos;
- mantenimiento de una estructura de ubicaciones ordenada;
- reducción del riesgo de saturación del sistema.

Para tres unidades, la capacidad nominal y utilizable se calculan como:

$$\text{Capacidad nominal} = 3\times 1{,}680 = 5{,}040\,\text{KLT}, \qquad \text{Capacidad utilizable} = 3\times 1{,}344 = \boxed{4{,}032\ \text{KLT}}.$$

La capacidad utilizable debe ser la empleada en el dimensionamiento, en las tablas de escenarios y en las restricciones del modelo de optimización. La capacidad nominal puede mantenerse únicamente como información técnica de referencia.

Desde el punto de vista operativo, Modula presenta las siguientes ventajas para Werk 12:

- **Alta densidad de almacenamiento:** utiliza la altura del edificio y reduce la superficie ocupada por racks convencionales.
- **Reducción de recorridos:** el material se entrega directamente al operador.
- **Ergonomía:** la extracción se realiza a una altura de trabajo estable, reduciendo agachamientos, estiramientos y manipulación en niveles elevados.
- **Mejor control del inventario:** cada movimiento puede vincularse digitalmente con una ubicación, bandeja y compartimento.
- **Adaptabilidad:** la distribución vertical puede modificarse cuando cambian las alturas de los materiales.

- **Compatibilidad con KLT:** la geometría de la bandeja es adecuada para la configuración validada de 24 cajas por bandeja.
- **Consolidación:** permite trasladar materiales almacenados en Werk 12b y F009 hacia un núcleo automático dentro de Werk 12.

El sistema puede conectarse con un WMS o con SAP EWM mediante una interfaz de integración. En el concepto futuro de HYDAC, SAP EWM debería generar o transmitir las tareas de almacenamiento y picking, mientras que el controlador del elevador ejecutaría la presentación física de la bandeja. Esta arquitectura permitiría registrar digitalmente los procesos de entrada, extracción, reposición, inventario y reubicación.

No obstante, la integración no debe considerarse automática únicamente por la instalación del equipo. Antes de la puesta en marcha deben validarse:

- la estructura de ubicaciones de SAP EWM;
- la comunicación entre SAP, middleware y software del elevador;
- la identificación de bandejas y compartimentos;
- la estrategia de confirmación de cantidades;
- la gestión de errores y diferencias de inventario;
- el procedimiento de contingencia ante fallos de comunicación;
- la operación manual durante mantenimiento o parada del equipo.

Dentro de la comparación realizada, Modula fue la alternativa seleccionada para el proyecto debido a la combinación de adecuación física, capacidad de carga, compatibilidad con las cajas existentes, ergonomía, facilidad de integración y resultado económico. La visita técnica y la configuración detallada permitieron, además, trabajar con un número concreto de bandejas y posiciones KLT, reduciendo la incertidumbre del dimensionamiento.

Entre los riesgos o aspectos que deben controlarse se encuentran la dependencia del equipo para materiales de alta rotación, la necesidad de mantenimiento preventivo, la disponibilidad de repuestos, la capacitación de operadores y la definición de un procedimiento de respaldo. Estos riesgos justifican la instalación de más de una unidad y la distribución equilibrada de los *fast movers* entre los tres elevadores.

En síntesis, el Modula ML50D representa la alternativa con el mayor grado de desarrollo para Werk 12. Su configuración de 70 bandejas y 24 KLT por bandeja proporciona $1{,}680$ posiciones nominales y $1{,}344$ posiciones utilizables por unidad después de aplicar la tolerancia operacional del 20 %. Por esta razón, tres unidades proporcionan una base robusta de $4{,}032$ posiciones KLT utilizables para la consolidación de CX y FSA/FSK.

8.6.b Kardex

Kardex es un proveedor internacional de soluciones de intralogística, almacenamiento automático y manipulación de materiales. Su cartera incluye elevadores verticales, carruseles, sistemas automáticos para piezas pequeñas, soluciones de preparación de pedidos y plataformas de software para el control del almacenamiento.

La alternativa comparable con el Modula ML50D es el **Kardex Shuttle 250/500**. Este equipo pertenece a la familia de módulos verticales Kardex Shuttle y está orientado al

almacenamiento de piezas, componentes, herramientas, repuestos y contenedores de pequeño y mediano tamaño.

El principio de funcionamiento es similar al de Modula: dos columnas de bandejas se ubican a ambos lados de un extractor central. Cuando el sistema recibe una orden, el extractor retira la bandeja correspondiente y la transporta hacia la abertura de servicio. El almacenamiento se adapta a la altura de los productos, evitando reservar para cada bandeja un espacio vertical mayor que el necesario.

Las características generales relevantes para la comparación son:

- **Modelo comparable:** Kardex Shuttle 250/500.
- **Ancho máximo de bandeja:** aproximadamente 4050 mm.
- **Carga máxima por bandeja:** hasta 560 kg, dependiendo de la configuración.
- **Altura del equipo:** configurable según el espacio disponible, con posibilidades ampliamente superiores a la altura necesaria en Werk 12.
- **Principio operativo:** almacenamiento automático *goods-to-person*.
- **Aplicaciones:** piezas pequeñas, repuestos, herramientas, componentes industriales y materiales de producción.
- **Configuración:** adaptable en altura, número de bandejas, aperturas de servicio y equipamiento de picking.

El Kardex Shuttle 250/500 presenta una capacidad de carga ligeramente superior a la configuración evaluada del Modula ML50D. Esta característica puede ser ventajosa cuando se almacenan componentes metálicos pesados o cuando la carga por bandeja no puede distribuirse de manera uniforme. No obstante, para el caso de CX y FSA/FSK, la carga máxima no constituye por sí sola el principal criterio de decisión. Deben analizarse conjuntamente la geometría de las cajas, el número de KLT por bandeja, el número total de bandejas y el rendimiento de picking.

Entre sus ventajas potenciales se encuentran:

- elevada capacidad de carga por bandeja;
- diseño modular y adaptable;
- posibilidad de incorporar aperturas adicionales;
- sistemas de apoyo al picking y señalización;
- integración con sistemas ERP y WMS;
- amplia experiencia internacional en almacenamiento automático;
- posibilidad de ampliar o modificar funciones después de la instalación.

Para una integración con SAP EWM, el equipo requeriría la definición de una interfaz entre SAP y el software de control Kardex. La arquitectura general seguiría el esquema de la Figura 8.7.

Esta integración permitiría transferir órdenes de almacenamiento y picking, confirmar cantidades, registrar diferencias y gestionar las ubicaciones del elevador desde una estructura digital común.

Sin embargo, la capacidad KLT exacta del Kardex Shuttle no debe estimarse únicamente a partir del ancho de bandeja. Para obtener un valor comparable con las $1{,}344$ posiciones utilizables del Modula se necesitaría una propuesta técnica específica que incluyera:

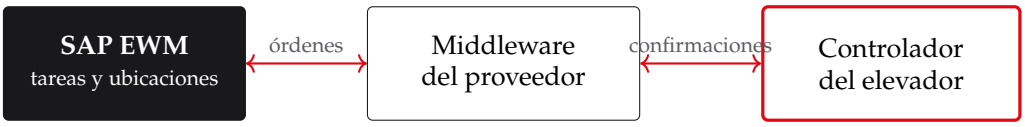


Figure 8.7: Arquitectura de integración de un elevador vertical con SAP EWM: las órdenes de almacenamiento y picking se transmiten a través de un middleware hacia el controlador del equipo, que confirma cantidades y ubicaciones de vuelta al sistema.

- ancho y profundidad exactos de la bandeja;
- orientación de las cajas KLT;
- cantidad de KLT por bandeja;
- distribución de alturas de 120 mm y 170 mm;
- número final de bandejas;
- reserva operacional equivalente al 20 %;
- límites de carga y distribución del peso.

Por lo tanto, Kardex constituye una alternativa técnicamente sólida y directamente comparable, pero la evaluación del proyecto no disponía del mismo nivel de detalle validado que se obtuvo para Modula. Una comparación económica definitiva debería considerar no solo el precio del equipo, sino también instalación, software, interfaces, mantenimiento, formación, disponibilidad de servicio técnico y coste total durante el ciclo de vida.

Para Werk 12, Kardex habría sido especialmente atractivo si la prioridad principal hubiera sido maximizar la carga por bandeja o disponer de una plataforma con opciones de expansión de gran escala. Sin embargo, la selección final debía basarse en la solución completa y no exclusivamente en una especificación individual.

8.6.c Hänel

Hänel es una empresa alemana con una amplia trayectoria en sistemas automáticos de almacenamiento y organización. Desde la década de 1950, la empresa ha desarrollado soluciones para archivos, piezas industriales, herramientas, componentes electrónicos y materiales de producción. Sus productos se caracterizan por una elevada capacidad de personalización y por su aplicación en entornos industriales.

El modelo considerado como alternativa para HYDAC fue el **Hänel Lean-Lift**. Este sistema utiliza un extractor vertical controlado electrónicamente que almacena los contenedores en posiciones optimizadas según la altura de los materiales. Su funcionamiento también corresponde al principio *goods-to-person*.

El Lean-Lift puede incorporar diferentes tipos de contenedores multifunción, divisores, soportes de herramientas y configuraciones especiales. Esta flexibilidad permite almacenar materiales con geometrías muy distintas dentro de una misma máquina.

Entre sus características relevantes se encuentran:

- **Modelo evaluado:** Hänel Lean-Lift.
- **Altura:** configurable de acuerdo con la altura útil del edificio.
- **Contenedores:** disponibles en múltiples anchuras y profundidades.

- **Carga por contenedor:** configuraciones de 250 kg, 500 kg, 700 kg e incluso 1000 kg, según versión.
- **Carga total del sistema:** diferentes configuraciones según el modelo y la aplicación.
- **Distribución interior:** separadores y accesorios adaptables para piezas pequeñas, herramientas y componentes.
- **Aplicaciones especiales:** almacenamiento ESD, componentes electrónicos, herramientas pesadas y materiales con geometrías irregulares.

La principal fortaleza de Hänel es la flexibilidad de sus contenedores. Mientras que una solución basada exclusivamente en cajas KLT tiende a utilizar una retícula relativamente uniforme, los contenedores multifunción permiten combinar:

- cajas estándar;
- compartimentos pequeños;
- piezas sin embalaje;
- herramientas;
- componentes largos;
- materiales pesados;
- accesorios con protección especial.

Esta flexibilidad podría ser valiosa si HYDAC decidiera almacenar en el mismo sistema materiales CX, FSA/FSK y otras familias con dimensiones diferentes. Sin embargo, también aumenta la necesidad de una ingeniería de detalle. La capacidad real no puede determinarse únicamente con un número genérico de contenedores, pues depende de la mezcla de alturas, del diseño interior y del peso de las piezas.

Desde la perspectiva ergonómica, el Lean-Lift presenta los materiales en una abertura de servicio, reduciendo recorridos y movimientos incómodos. También puede equiparse con sistemas de señalización, identificación de compartimentos y asistencia al picking.

La integración digital debería considerar el software de gestión de Hänel y su conexión con SAP EWM, siguiendo la misma arquitectura general de la Figura 8.7. Como en las demás alternativas, antes de seleccionar el equipo sería necesario validar:

- creación y transmisión de tareas;
- estructura de ubicaciones;
- confirmación de picking;
- control de cantidades;
- comunicación en tiempo real;
- gestión de usuarios;
- trazabilidad de movimientos;
- funcionamiento durante una interrupción de la interfaz.

Las principales ventajas de Hänel para Werk 12 serían:

- alto grado de personalización;

- experiencia en aplicaciones industriales;
- posibilidad de almacenar cargas muy diferentes;
- soluciones para materiales sensibles o pesados;
- buena ergonomía;
- aprovechamiento dinámico de la altura;
- flexibilidad para incorporar otras familias de productos.

Como limitación, la comparación no contaba con una configuración final de bandejas y KLT equivalente a la propuesta de Modula. Por ello, no sería correcto asignar al Lean-Lift una capacidad KLT sin disponer de un *slicing* realizado por el proveedor. La alternativa requeriría una fase adicional de ingeniería para determinar la capacidad nominal, aplicar la reserva del 20 % y obtener así la capacidad utilizable.

Hänel representa, en consecuencia, una alternativa robusta y flexible, especialmente atractiva para una mezcla heterogénea de materiales. Para el caso específico de HYDAC, Modula ofreció una configuración más directamente vinculada con las cajas KLT y con el dimensionamiento ya validado para CX y FSA/FSK.

8.6.d SSI Schäfer

SSI Schäfer es una empresa familiar alemana y uno de los proveedores internacionales más relevantes de sistemas de almacenamiento, transporte, picking y automatización intralogística. La empresa desarrolla desde racks y contenedores hasta almacenes automáticos de gran escala, transportadores, software de gestión y soluciones integrales para centros logísticos.

El modelo comparable analizado para Werk 12 fue el **SSI LOGIMAT**. Se trata de un módulo vertical de almacenamiento que combina almacenamiento compacto y preparación de pedidos. El sistema utiliza dos columnas de bandejas y un elevador central que transporta automáticamente la bandeja seleccionada hacia la abertura de trabajo.

Sus principales especificaciones generales son:

- **Modelo evaluado:** SSI LOGIMAT.
- **Altura mínima aproximada:** 2450 mm.
- **Altura máxima aproximada:** 23 850 mm, según configuración.
- **Ajuste vertical:** almacenamiento en incrementos de 25 mm.
- **Ancho máximo estándar de bandeja:** aproximadamente 4025 mm.
- **Profundidad estándar de bandeja:** aproximadamente 815 mm, con opciones especiales de mayor profundidad.
- **Carga por bandeja:** hasta 700 kg, dependiendo de la versión.
- **Carga total de máquina:** hasta aproximadamente 80 t en determinadas configuraciones.

La carga máxima por bandeja del LOGIMAT puede representar una ventaja para componentes industriales pesados. Su altura altamente configurable también permite aprovechar edificios de gran altura y ampliar significativamente la superficie de almacenamiento vertical.

Entre sus principales ventajas se encuentran:

- construcción robusta;
- elevada capacidad de carga;
- uso eficiente de la altura del edificio;
- ajuste dinámico de bandejas;
- reducción de superficie ocupada;
- integración dentro de soluciones intralogísticas más amplias;
- posibilidad de combinar el elevador con transportadores, estaciones de picking y software de almacén;
- experiencia del proveedor en proyectos integrales.

Para HYDAC, SSI Schäfer tendría especial interés si el proyecto evolucionara desde la instalación de elevadores independientes hacia un sistema de automatización integral que incluyera transporte, preparación de pedidos, consolidación, clasificación y software centralizado.

La geometría estándar de bandeja es comparable con las dimensiones analizadas en las demás alternativas. Sin embargo, la capacidad de cajas KLT debe validarse con un diseño específico. Una diferencia de pocos milímetros en profundidad o en espacios de seguridad puede modificar el número de cajas por bandeja. Por ello, el cálculo debería realizarse mediante:

$$N_{\text{KLT por bandeja}} = N_{\text{KLT en ancho}} \times N_{\text{KLT en profundidad}},$$

considerando adicionalmente separadores, bordes de bandeja, tolerancias, orientación de cajas y acceso del operador. Posteriormente, la capacidad total se calcularía como:

$$K_{\text{nominal}} = N_{\text{bandejas}} \times N_{\text{KLT por bandeja}}, \qquad K_{\text{utilizable}} = 0.80 \times K_{\text{nominal}}.$$

La integración con SAP EWM podría realizarse mediante el software del proveedor, middleware o una interfaz específica. En un proyecto integral, SSI Schäfer podría ofrecer la ventaja de suministrar tanto el equipo físico como otros subsistemas de transporte y control. Sin embargo, esta amplitud también podría introducir mayor complejidad, mayor alcance de implementación y una dependencia más elevada del proveedor.

Las principales limitaciones para la aplicación analizada fueron:

- ausencia de un dimensionamiento KLT final comparable con Modula;
- necesidad de validar la configuración exacta de bandejas;
- posible sobredimensionamiento para un proyecto limitado a CX y FSA/FSK;
- mayor complejidad si se implementa como parte de una solución intralogística integral;
- necesidad de comparar detalladamente inversión, mantenimiento, software y tiempos de implementación.

SSI LOGIMAT representa una solución técnicamente sólida y especialmente adecuada para cargas elevadas o proyectos de automatización de mayor alcance. Para Werk 12, habría sido necesario desarrollar una oferta específica que permitiera comparar capacidad utilizable, rendimiento, integración y coste total en las mismas condiciones que la configuración Modula ML50D.

8.6.e Síntesis comparativa de los proveedores

La Tabla 8.3 resume las principales características de las cuatro alternativas, y la Figura 8.8 representa el proceso de selección aplicado sobre ellas.

Table 8.3: Comparación general de las alternativas de almacenamiento vertical

Proveedor	Modelo	Carga/bandeja	Capacidad KLT	Evaluación para Werk 12
Modula	ML50D	Hasta 500 kg	1,680 nom. y 1,344 util. por unidad	Configuración validada para 70 bandejas, 24 KLT por bandeja y tolerancia del 20 %. Alternativa seleccionada.
Kardex	Shuttle 250/500	Hasta 560 kg	Pendiente de configuración específica	Directamente comparable, con elevada flexibilidad y capacidad de carga. Requiere validar bandejas, KLT y coste total.
Hänel	Lean-Lift	250 kg–1000 kg, según versión	Pendiente de *slicing* del proveedor	Muy flexible para materiales heterogéneos y configuraciones especiales. Menor nivel de detalle disponible para la aplicación CX/FSA-FSK.
SSI Schäfer	SSI LOGIMAT	Hasta 700 kg	Pendiente de configuración específica	Solución robusta y escalable, especialmente interesante para cargas pesadas o automatización integral. Puede resultar sobredimensionada para el alcance inicial.

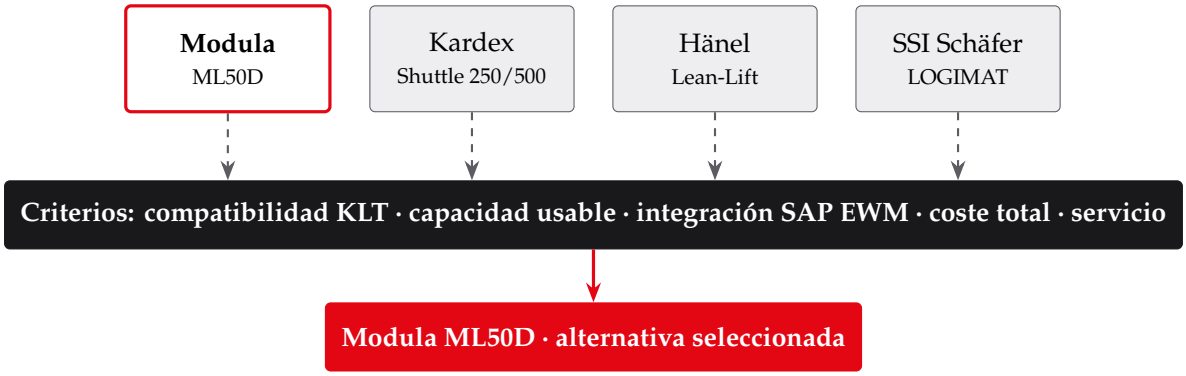


Figure 8.8: Síntesis de la selección entre los cuatro proveedores VLM: aplicando los criterios de decisión sobre las cuatro alternativas, el Modula ML50D resulta la opción más adecuada para Werk 12.

La comparación muestra que las cuatro empresas ofrecen soluciones técnicamente capaces de reducir recorridos, mejorar la ergonomía y aumentar la densidad de almace-

namiento. Sin embargo, la selección no debe realizarse únicamente a partir de la carga máxima o de la altura del equipo.

Los criterios decisivos para HYDAC son:

- compatibilidad real con KLT de 400×300 mm;
- capacidad utilizable después de aplicar la tolerancia del 20 %;
- rendimiento durante picos de movimientos 261;
- integración con SAP EWM;
- disponibilidad y calidad del servicio técnico;
- coste de inversión e instalación;
- mantenimiento anual;
- facilidad de uso;
- ergonomía;
- disponibilidad de repuestos;
- flexibilidad frente a futuras modificaciones.

Bajo estos criterios, Modula presentó la propuesta más desarrollada para el caso específico de Werk 12. La configuración validada permite dimensionar de manera trazable la capacidad nominal y utilizable, mientras que las alternativas de Kardex, Hänel y SSI Schäfer requerirían una ingeniería adicional antes de poder realizar una comparación definitiva en términos de KLT, utilización y coste por posición.

8.7 Evaluación técnica

La evaluación técnica se concentró en determinar si la alternativa podía cumplir los requerimientos físicos y operacionales de Werk 12. En esta etapa, el Modula ML50D fue analizado considerando altura, dimensiones de bandeja, capacidad de carga, número de bandejas, capacidad KLT, footprint, ergonomía e integración SAP EWM.

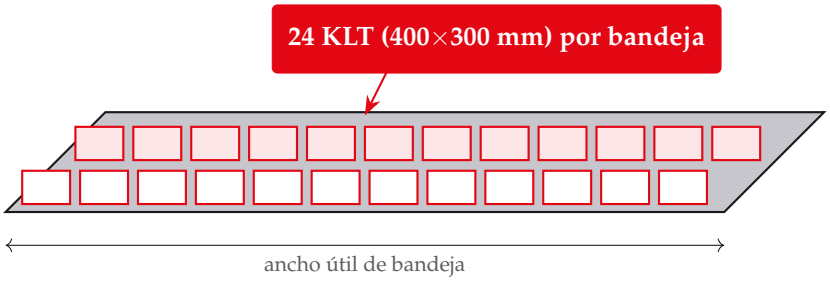


Figure 8.9: Esquema de la bandeja del Modula ML50D con su configuración validada de 24 contenedores KLT.

La capacidad por lift se calcula como:

$$K_{lift} = 70 \cdot 24 = 1,680 \text{ KLT} \tag{8.1}$$

Esta capacidad fue utilizada como base para el modelamiento desarrollado en el capítulo anterior. Una ventaja importante de esta configuración es que no se basa en una

Table 8.4: Parámetros técnicos considerados para Modula ML50D

Parámetro	Valor considerado
Altura total de máquina	6,900 mm
Dimensiones de bandeja	4,100 mm x 857 mm
Carga máxima por bandeja	500 kg
Bandejas efectivas por lift	70
KLT por bandeja	24
Capacidad por lift	1,680 KLT
Tamaño KLT utilizado	400 mm x 300 mm
Grid vertical	25 mm

estimación genérica, sino en una configuración operacionalmente robusta. La reducción desde una capacidad teórica mayor hacia 70 bandejas efectivas permite considerar tolerancias, seguridad y flexibilidad ante variaciones futuras en altura de cajas.

Otro aspecto técnico relevante fue la carga máxima por bandeja. El valor de 500 kg por bandeja permite almacenar componentes técnicos con pesos variables y entrega flexibilidad para distintos grupos de materiales. Además, el grid de 25 mm permite adaptar la ubicación vertical de las bandejas según la altura real de los KLT, lo que mejora el uso del espacio interno.

Desde la perspectiva de layout, la altura de 6,9 m y el footprint compacto del sistema lo hacían compatible con la instalación dentro de Werk 12. Esta compatibilidad física fue un criterio decisivo, porque una alternativa técnicamente potente pero difícil de instalar dentro del espacio disponible no habría sido adecuada para el proyecto.

8.8 Evaluación operacional

La evaluación operacional analizó cómo cada alternativa contribuiría a mejorar el funcionamiento diario del almacén. Esta evaluación consideró picking, relocalizaciones internas, recorridos, ergonomía, capacidad de consolidación y estabilidad del sistema. En esta dimensión, los VLM y específicamente Modula ML50D presentaron ventajas claras frente a soluciones tradicionales.

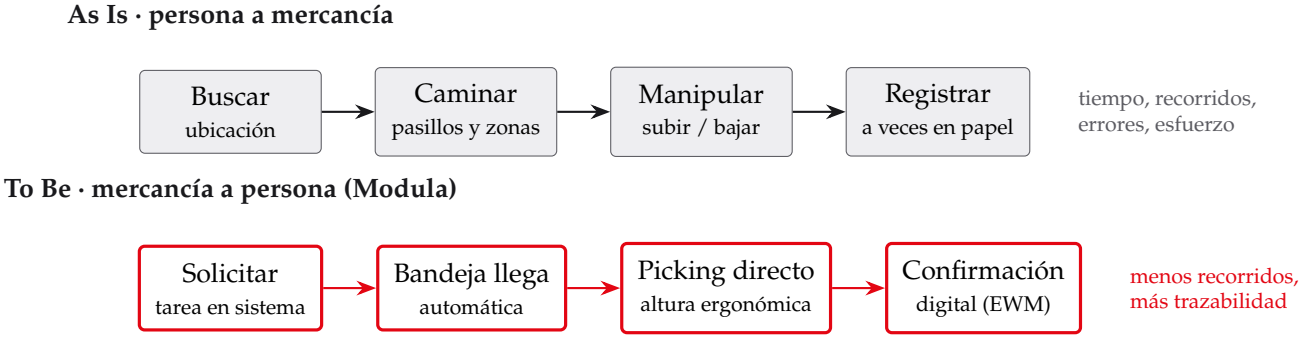


Figure 8.10: Comparación del flujo operacional de picking antes y después de la incorporación del VLM.

Una de las principales ventajas operacionales de Modula es el cambio desde una lógica person to goods hacia una lógica goods to person. En los sistemas manuales tradicionales, el operador debe desplazarse hacia el material, buscarlo, retirarlo y eventualmente volver

al punto de entrega. En un VLM, el sistema acerca la bandeja al operador, reduciendo recorridos y tiempos de búsqueda. Esta lógica es especialmente relevante cuando existen altos volúmenes de movimientos 261 hacia producción.

Otra ventaja es la reducción de relocalizaciones internas. Si CX y FSA/FSK se consolidan dentro de una estructura automatizada y organizada, disminuye la necesidad de mover materiales entre zonas como Werk 12b, 9600 y F009. Esto impacta directamente los movimientos 315 y permite reducir actividades que consumen tiempo sin agregar valor directo.

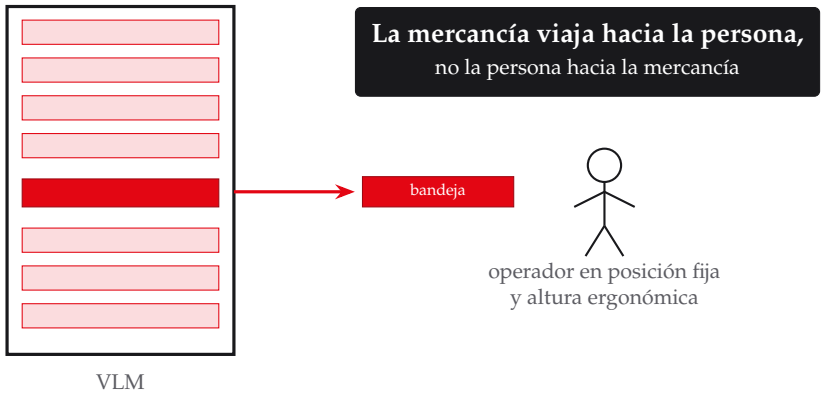


Figure 8.11: Principio *goods to person*: el VLM entrega la bandeja en la estación de picking, eliminando búsquedas y desplazamientos.

La evaluación operacional también consideró la ergonomía. El picking a altura de trabajo reduce esfuerzos físicos, movimientos repetitivos incómodos y riesgos asociados a racks manuales. En operaciones con alta frecuencia de picking, esta mejora no es secundaria, ya que puede afectar productividad, seguridad y estabilidad del desempeño.

Table 8.5: Impacto operacional esperado de una solución VLM

Dimensión operacional	Impacto esperado
Picking	Reducción de tiempos de búsqueda y desplazamiento
Relocalizaciones	Menor necesidad de movimientos internos 315
Ergonomía	Picking a altura adecuada y menor esfuerzo físico
Consolidación	Integración de CX y FSA/FSK dentro de Werk 12
Trazabilidad	Mayor control de ubicaciones y compatibilidad con SAP EWM
Uso de espacio	Mayor densidad por metro cuadrado

8.9 Evaluación económica preliminar

Aunque la evaluación económica detallada se desarrolla en el capítulo siguiente, durante la comparación de alternativas fue necesario considerar si cada opción podía justificar su inversión. En este sentido, las soluciones automatizadas se evaluaron no solo por su costo, sino por su capacidad de generar ahorros. Los beneficios esperados se relacionan con reducción de personal dedicado a movimientos manuales, ahorro en inventario, liberación de superficie, disminución de relocalizaciones y eliminación de posiciones redundantes.

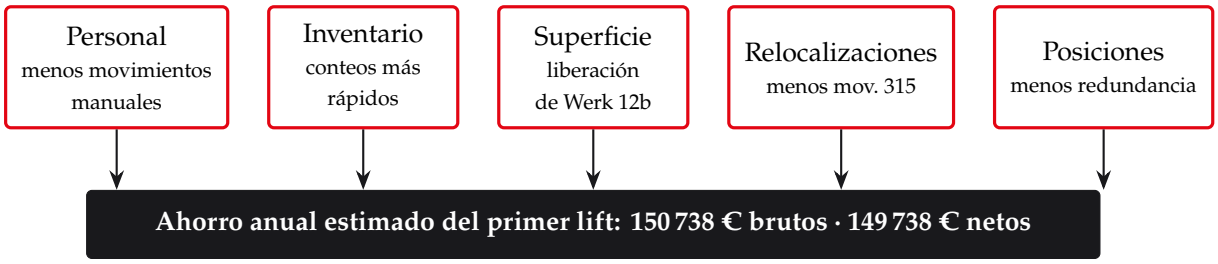


Figure 8.12: Componentes de ahorro asociados a la solución Modula: cinco categorías de beneficio directo alimentan la evaluación económica.

El Modula ML50D presentaba una inversión por unidad aproximada de 72,837 euros, más costos de mantenimiento considerados en el modelo financiero posterior. Esta inversión debía compararse con los ahorros anuales potenciales. La estimación corregida de ahorros para la primera unidad fue de 150,738 euros anuales antes de considerar mantenimiento, lo que sugería una recuperación rápida de la inversión. Sin embargo, la evaluación económica completa requería analizar rendimientos decrecientes y escenarios de uno a cinco lifts, lo cual se desarrolla en los capítulos posteriores.

En esta etapa, el punto principal fue confirmar que la alternativa Modula no solo era técnicamente viable, sino también económicamente prometedora. Esto justificó profundizar el análisis mediante VAN, TIR, ROI y payback.

8.10 Evaluación estratégica

La evaluación estratégica consideró el alineamiento de cada alternativa con Nordstern 2026. Este criterio fue especialmente importante porque el proyecto no buscaba únicamente resolver una restricción inmediata, sino preparar Werk 12 para un sistema logístico futuro más digital, compacto y escalable.

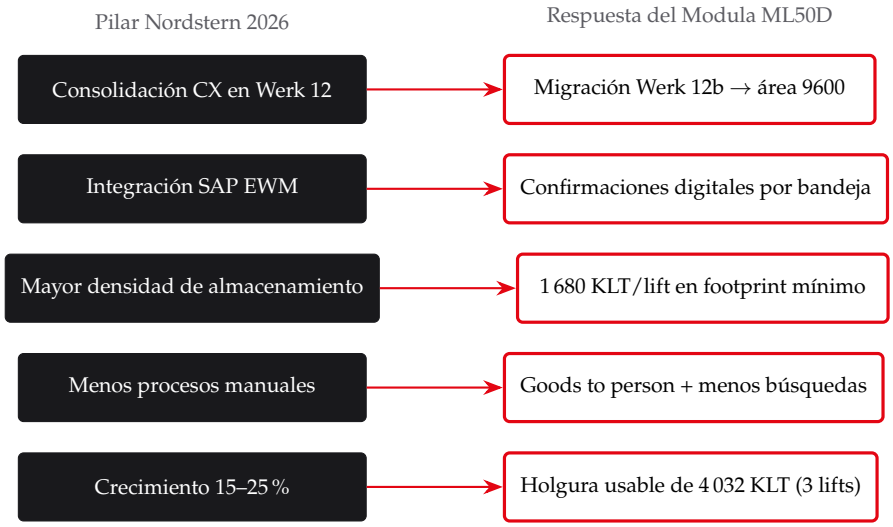


Figure 8.13: Alineación entre los pilares de Nordstern 2026 y las capacidades del Modula ML50D.

Desde esta perspectiva, Modula ML50D presentaba un buen ajuste por las siguientes razones:

1. Permite consolidar CX dentro de Werk 12.

2. Reduce la dependencia de F009 para FSA/FSK.
3. Aumenta densidad de almacenamiento.
4. Es compatible con integración SAP EWM.
5. Mejora ergonomía y seguridad operacional.
6. Facilita la transición hacia procesos más digitales y controlados.
7. Permite crear una base escalable para crecimiento futuro.

Comparado con racks tradicionales o expansión física, Modula contribuye de manera más directa a la transformación logística deseada. Comparado con shuttle systems o AS/RS, presenta menor complejidad y un mejor ajuste al alcance específico del proyecto. Por ello, desde el punto de vista estratégico, los VLM y en particular el Modula ML50D aparecieron como una solución equilibrada.

8.11 Matriz de decisión

Para ordenar la evaluación, se construye una matriz cualitativa de decisión. Esta matriz no reemplaza los modelos cuantitativos posteriores, sino que permite justificar por qué ciertas alternativas fueron descartadas o consideradas menos adecuadas. La escala utilizada es cualitativa: bajo, medio y alto.

Table 8.6: Matriz cualitativa de decisión de alternativas

Alternativa	Capacidad	Operación	SAP EWM	Inversión	Ajuste estratégico
Racks	Media	Baja	Baja	Alta en costo bajo	Bajo
Nuevo almacén	Alta	Media	Media	Baja en costo alto	Medio
Shuttle system	Alta	Alta	Alta	Baja en costo alto	Medio
AS/RS	Muy alta	Alta	Alta	Baja en costo muy alto	Medio
Modula ML50D	Alta	Alta	Alta	Alta en retorno	Alto

En la tabla anterior, la columna de inversión se interpreta desde la conveniencia relativa y no solo desde el costo inicial. Por ejemplo, racks tradicionales pueden tener menor CAPEX inicial, pero menor capacidad de generar transformación y ahorro. En cambio, Modula requiere inversión, pero presenta un retorno esperado alto y un ajuste fuerte con los objetivos del proyecto. Esta interpretación es importante porque una decisión industrial no debe considerar únicamente el precio de compra, sino el valor generado por la alternativa.

8.12 Selección de alternativa

A partir del análisis técnico, operacional, económico y estratégico, se seleccionó el Modula ML50D como alternativa principal para el diseño de la solución de almacenamiento automatizado en HYDAC Werk 12. Esta selección se fundamenta en su capacidad de almacenamiento, compatibilidad con KLT, footprint compacto, ergonomía, integración SAP EWM y alineación con Nordstern 2026.

La selección de Modula ML50D no implica que las demás alternativas sean técnicamente deficientes. Más bien, significa que para este contexto específico, con restricciones de espacio, necesidad de consolidación, crecimiento proyectado, integración digital y búsqueda de retorno económico, Modula presentaba el mejor equilibrio. Kardex, Hänel y SSI Schäfer fueron referencias relevantes dentro del benchmark, pero la configuración Modula ML50D entregó una base concreta y validada para el modelo de capacidad y la evaluación financiera.

La alternativa seleccionada permite construir un sistema compacto capaz de consolidar CX y FSA/FSK dentro de Werk 12. Cada unidad entrega 1,680 posiciones KLT y tres unidades entregan 5,040 posiciones KLT nominales. Esta capacidad, combinada con la evaluación de utilización y tolerancia operacional, permitió avanzar hacia la recomendación de tres módulos como configuración robusta.

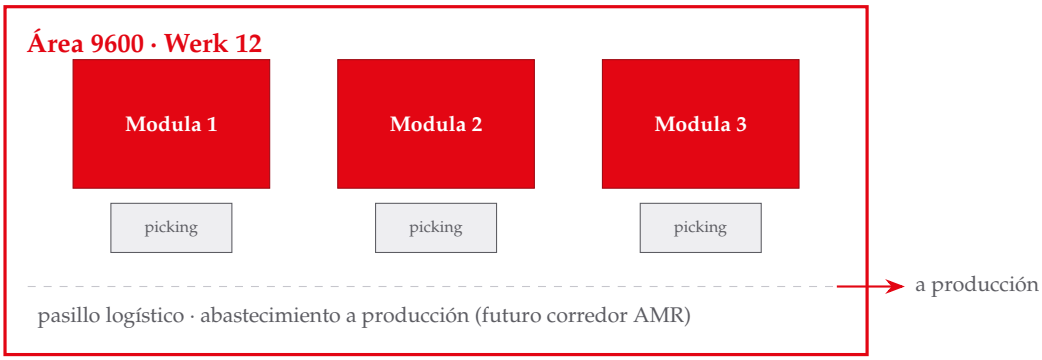


Figure 8.14: Layout conceptual de los tres Modula ML50D en el área 9600, con estaciones de picking y corredor logístico hacia producción.

8.13 Relación con el modelo de capacidad

La evaluación de alternativas se conecta directamente con el modelamiento de capacidad desarrollado en el capítulo anterior. Una vez seleccionada la alternativa Modula ML50D como tecnología base, fue posible utilizar sus parámetros técnicos para evaluar escenarios de uno a cinco módulos. En este sentido, la selección tecnológica y el modelamiento de capacidad se alimentan mutuamente.

El benchmark permitió identificar qué tecnología era adecuada. El modelo de capacidad permitió determinar cuántas unidades de esa tecnología eran necesarias. La evaluación económica y la optimización, desarrolladas en los capítulos siguientes, permitirán confirmar si la configuración recomendada también es financieramente conveniente y matemáticamente óptima bajo restricciones reales.

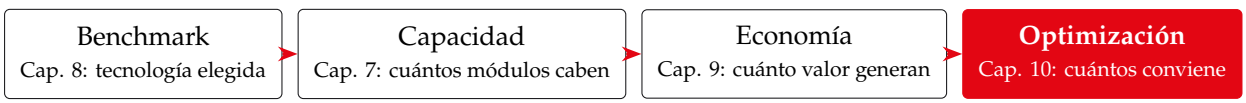


Figure 8.15: Encadenamiento del análisis: la selección tecnológica habilita el modelamiento de capacidad, la evaluación económica y la optimización final.

Esta relación evita una decisión incompleta. Si solo se hubiera realizado benchmark, la memoria podría justificar Modula como tecnología, pero no cuántos módulos instalar. Si

solo se hubiera hecho capacidad, se habría podido calcular cuántas posiciones caben, pero no justificar por qué Modula y no otra alternativa. Por ello, la combinación de evaluación tecnológica y modelamiento de capacidad es esencial para la coherencia del proyecto.

8.14 Síntesis del capítulo

La evaluación de alternativas permitió comparar distintas formas de responder a los desafíos logísticos de HYDAC Werk 12. Las soluciones tradicionales, como racks o expansión física, presentan menor complejidad inicial, pero no resuelven de forma estructural la necesidad de densidad, consolidación, ergonomía e integración digital. Las soluciones altamente automatizadas, como shuttle systems o AS/RS completos, ofrecen gran capacidad, pero pueden implicar mayor complejidad, inversión y sobredimensionamiento respecto del alcance específico del proyecto.

Dentro de este conjunto de alternativas, los Vertical Lift Modules representan una solución equilibrada. Permiten aumentar densidad, reducir superficie, mejorar ergonomía, disminuir recorridos y apoyar la integración con SAP EWM. Entre los proveedores evaluados, Modula ML50D fue seleccionado como alternativa principal debido a su ajuste técnico, capacidad validada, compatibilidad con el layout de Werk 12 y alineación con Nordstern 2026.

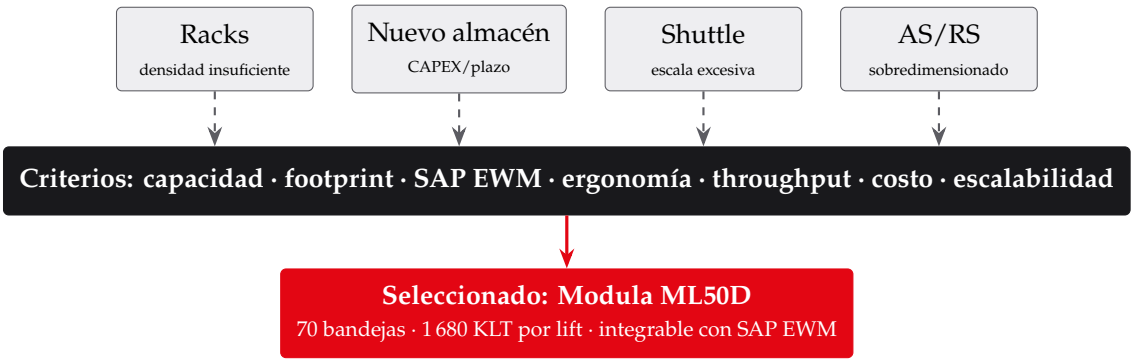


Figure 8.16: Síntesis de la evaluación de alternativas: aplicación de criterios sobre las opciones tecnológicas y selección del Modula ML50D.

En síntesis, la alternativa seleccionada permite avanzar desde un sistema disperso y parcialmente manual hacia una arquitectura de almacenamiento compacta, automatizada y preparada para crecimiento. Esta selección constituye la base para la evaluación técnico económica del capítulo siguiente, donde se analizará si la inversión en Modula ML50D se justifica mediante ahorros anuales, VAN, TIR, ROI y payback.

9 Evaluación Técnico-Económica

9.1 Introducción a la evaluación técnico-económica

La evaluación técnico-económica constituye una de las etapas más relevantes de esta memoria, ya que permite transformar la propuesta de automatización en una decisión de inversión cuantificable. Hasta este punto se ha demostrado que HYDAC Werk 12 enfrenta restricciones de capacidad, dispersión de materiales, dependencia de F009, alto volumen de movimientos hacia producción y necesidad de integración futura con SAP EWM. Sin embargo, para que una solución automatizada sea justificable dentro de una empresa industrial, no basta con que sea técnicamente viable o operacionalmente atractiva. También debe demostrar que genera valor económico, que recupera la inversión en un plazo razonable y que entrega beneficios suficientes frente al capital requerido.

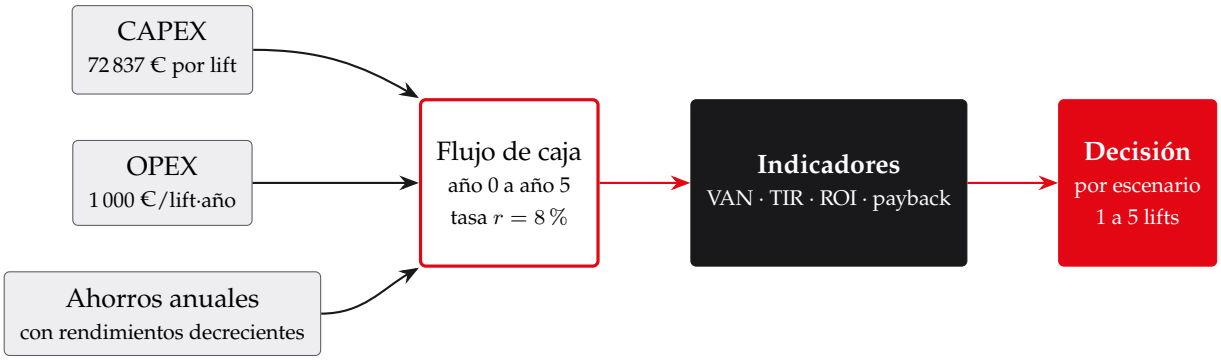


Figure 9.1: Estructura de la evaluación técnico-económica: costos, ahorros y flujos descontados alimentan los indicadores financieros de cada escenario.

En este capítulo se evalúa económicamente la implementación de módulos verticales Modula ML50D en Werk 12, considerando escenarios desde una hasta cinco unidades. La evaluación incorpora inversión inicial, costos de mantenimiento, ahorros operacionales, horizonte de análisis de cinco años, tasa de descuento, flujos de caja e indicadores financieros. Además, se considera el efecto de rendimientos decrecientes, ya que no todos los módulos adicionales generan el mismo nivel de ahorro marginal. Esta lógica es fundamental porque permite explicar por qué instalar más equipos no siempre implica una mejor decisión económica.

El análisis se desarrolla desde una perspectiva de Ingeniería Civil Industrial, integrando criterios técnicos, operacionales y financieros. La pregunta económica no es solamente si un Modula ML50D se paga rápidamente, sino qué configuración entrega el mejor balance

entre beneficio económico, capacidad operacional y alineación estratégica con Nordstern 2026. Por esta razón, el capítulo no se limita a calcular indicadores aislados, sino que interpreta los resultados como parte de un proceso de toma de decisiones.

9.2 Supuestos económicos

La evaluación financiera se construye a partir de un conjunto de supuestos económicos definidos y validados durante el proyecto. Estos supuestos permiten comparar los escenarios de manera consistente y trazable. Se considera una inversión por cada unidad Modula ML50D, un costo anual de mantenimiento por equipo, un horizonte de análisis de cinco años y una tasa de descuento utilizada para actualizar los flujos futuros.

Table 9.1: Supuestos económicos utilizados en la evaluación

Parámetro	Valor utilizado
Inversión por Modula ML50D	72,837 €
Costo anual de mantenimiento por lift	1,000 €
Horizonte de evaluación	5 años
Tasa de descuento	8%
Ahorro anual bruto estimado para el primer lift	150,738 €
Ahorro anual neto del primer lift	149,738 €
Ahorro anual neto de referencia para 3 lifts	237,000 €



Figure 9.2: Supuestos económicos utilizados en la evaluación financiera de los escenarios.

La inversión por lift corresponde al costo de adquisición considerado para el Modula ML50D. El costo de mantenimiento se descuenta anualmente de los beneficios generados por cada unidad. El horizonte de cinco años permite evaluar el proyecto en un período suficientemente amplio para capturar los beneficios operacionales, pero sin extender artificialmente la rentabilidad. La tasa de descuento de 8% se utiliza para traer los flujos futuros a valor presente y comparar adecuadamente beneficios e inversión inicial.

El ahorro bruto anual del primer lift se estimó en 150,738 €, considerando reducciones asociadas a personal, inventario, superficie, relocalizaciones internas y posiciones de almacenamiento. Al descontar 1,000 € de mantenimiento anual, el ahorro neto del primer lift queda en 149,738 €. Para el escenario de tres lifts se utiliza el valor de referencia de HYDAC de 237,000 € netos anuales, el cual fue utilizado para calibrar la función de rendimientos decrecientes.

9.3 CAPEX

El CAPEX, o capital expenditure, corresponde a la inversión inicial necesaria para adquirir los módulos Modula ML50D. En esta evaluación, el costo de inversión por unidad se considera igual a 72,837 €. Por lo tanto, la inversión total para un escenario con (x) lifts se calcula como:

$$CAPEX(x) = x \cdot C_{lift} \tag{9.1}$$

donde:

$$C_{lift} = 72,837 \tag{9.2}$$

Así, para cada escenario se obtiene:

Table 9.2: CAPEX por escenario de inversión

Escenario	Número de lifts	CAPEX total
Escenario 1	1	72,837 €
Escenario 2	2	145,674 €
Escenario 3	3	218,511 €
Escenario 4	4	291,348 €
Escenario 5	5	364,185 €

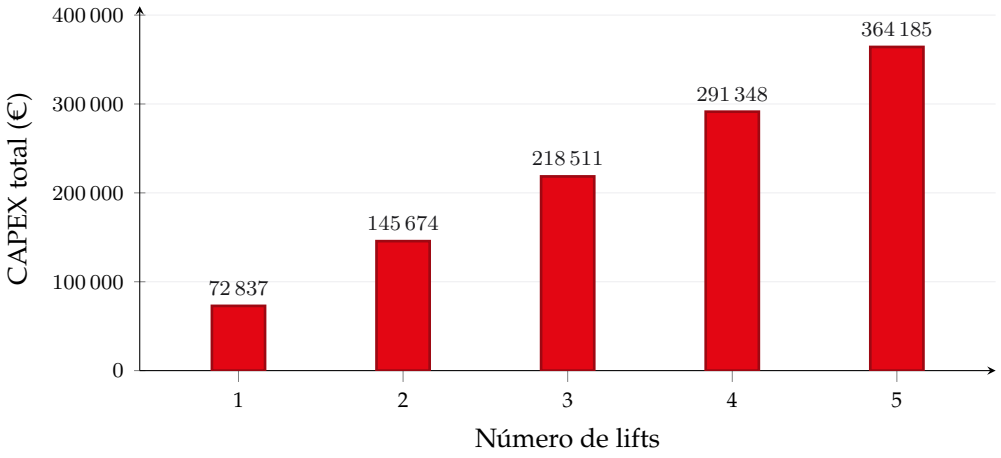


Figure 9.3: CAPEX total por escenario: la inversión crece linealmente con el número de módulos.

La tabla muestra que el CAPEX crece linealmente con el número de unidades instaladas. Cada lift adicional agrega el mismo costo de inversión. Esta característica es importante porque, mientras el costo crece de forma lineal, los beneficios no necesariamente crecen al mismo ritmo. En proyectos con rendimientos decrecientes, el primer equipo suele capturar los ahorros más importantes, mientras que las unidades adicionales aportan beneficios marginales menores. Por ello, la decisión óptima no puede basarse en instalar tantos equipos como sea posible, sino en comparar el beneficio marginal de cada unidad con su costo incremental.

9.4 OPEX

El OPEX, u operational expenditure, corresponde a los costos operacionales recurrentes asociados al funcionamiento del sistema. En esta evaluación se considera principalmente el costo anual de mantenimiento de cada módulo Modula ML50D. El mantenimiento anual por lift se estima en 1,000 €, por lo que el costo anual total de mantenimiento para (x) lifts se calcula como:

$$OPEX(x) = x \cdot M_{lift} \tag{9.3}$$

donde:

$$M_{lift} = 1,000 \tag{9.4}$$

Table 9.3: OPEX anual de mantenimiento por escenario

Escenario	Número de lifts	OPEX anual de mantenimiento
Escenario 1	1	1,000 €
Escenario 2	2	2,000 €
Escenario 3	3	3,000 €
Escenario 4	4	4,000 €
Escenario 5	5	5,000 €

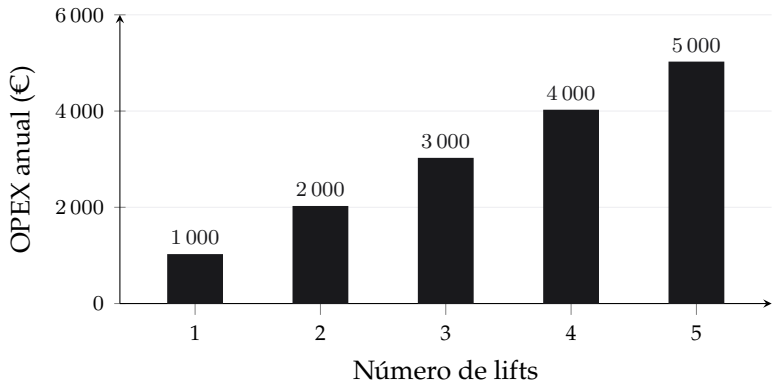


Figure 9.4: OPEX anual de mantenimiento por escenario.

Aunque el mantenimiento anual es bajo en comparación con los ahorros esperados, debe incluirse para evitar sobreestimar los beneficios del proyecto. En particular, cuando se comparan escenarios con más unidades, el OPEX aumenta de manera lineal y reduce el flujo neto anual. Sin embargo, en este caso el factor que más afecta la comparación entre escenarios no es el mantenimiento, sino la disminución del beneficio marginal de cada lift adicional.

9.5 Ahorros esperados

Los ahorros esperados se calcularon a partir de cinco componentes principales: ahorro de personal, ahorro en inventario, reducción de superficie, reducción de relocalizaciones

internas y reducción de posiciones de almacenamiento. Estos componentes reflejan beneficios directos derivados de la automatización y consolidación de materiales en Werk 12.



Figure 9.5: Distribución porcentual de los ahorros anuales estimados por categoría: personal (56 192 €), posiciones (33 380 €), inventario (27 720 €), superficie (16 920 €) y relocalizaciones (16 718 €).

9.5.a Ahorro de personal

El ahorro de personal se asocia a la reducción de tiempo utilizado en movimientos manuales, búsqueda de materiales, desplazamientos y actividades de manipulación menos eficientes. El cálculo utilizado es:

$$A_{personal} = 2,838 \cdot 1.1 \cdot 12 \cdot 1.5 \tag{9.5}$$

donde 2,838 representa el volumen de movimientos considerado, 1.1 corresponde al tiempo por movimiento, 12 al factor de anualización utilizado y 1.5 al factor de costo laboral aplicado. El cálculo entrega:

$$A_{personal} = 56,192$$

€ (9.6)

Este ahorro representa uno de los componentes más importantes del beneficio total, ya que la automatización reduce actividades manuales repetitivas y permite utilizar mejor el tiempo operativo.

9.5.b Ahorro en inventario

El ahorro en inventario se relaciona con la reducción de esfuerzo requerido para conteos manuales. La automatización y mayor precisión de ubicaciones permiten reducir el tiempo dedicado a inventarios físicos. El cálculo utilizado es:

$$A_{inventario} = 22 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 90 \tag{9.7}$$

donde 22 corresponde al número de personas, 7 a las horas por día, 2 a los días considerados y 90 al costo por hora. El resultado es:

$$A_{inventario} = 27,720$$

€ (9.8)

Este ahorro es relevante porque representa una mejora en control, trazabilidad y reducción de actividades manuales de conteo.

9.5.c Ahorro por reducción de superficie

La consolidación de CX y FSA/FSK dentro de Werk 12 permite liberar superficie actualmente utilizada en Werk 12b. Se considera una superficie de $235(m^2)$ y un costo de $6€/\text{m}(^2)$ mensual. El cálculo es:

$$A_{superficie} = 235 \cdot 6 \cdot 12 \tag{9.9}$$

$$A_{superficie} = 16,920$$

€ (9.10)

Este ahorro muestra que la automatización no solo genera valor por reducir movimientos, sino también por liberar espacio físico que puede ser utilizado para otros fines productivos o logísticos.

9.5.d Ahorro por relocalizaciones internas

El ahorro por relocalizaciones internas se asocia a la reducción de movimientos 315, o Umlagerungen, derivados de la dispersión actual de materiales. El cálculo considera ahorros para CX, FSA/FSK y una estimación asociada a KH:

$$A_{relocalizaciones} = (560 \cdot 7) + (1,114 \cdot 7) + 5,000 \tag{9.11}$$

$$A_{relocalizaciones} = 3,920 + 7,798 + 5,000 = 16,718$$

€ (9.12)

Este componente es especialmente importante porque conecta directamente el análisis SAP con el beneficio económico. Reducir movimientos internos que no agregan valor directo permite disminuir costos logísticos y simplificar la operación.

9.5.e Ahorro por reducción de posiciones de almacenamiento

El ahorro por reducción de posiciones se calcula considerando posiciones redundantes o liberadas por la consolidación en Modula. Para CX se consideran 150 posiciones y para FSA/FSK 280 posiciones, con un costo mensual de 5.5 € por posición. Además, se incluye una estimación de 5,000 € para KH:

$$A_{posiciones} = (150 \cdot 5.5 \cdot 12) + (280 \cdot 5.5 \cdot 12) + 5,000 \tag{9.13}$$

$$A_{posiciones} = 9,900 + 18,480 + 5,000 = 33,380$$

€ (9.14)

Este ahorro refleja el valor económico de reducir almacenamiento convencional y avanzar hacia una solución de mayor densidad.

9.5.f Ahorro anual total

El ahorro anual total se obtiene sumando los cinco componentes:

$$A_{total} = A_{personal} + A_{inventario} + A_{superficie} + A_{relocalizaciones} + A_{posiciones} \tag{9.15}$$

$$A_{total} = 56,192 + 27,720 + 16,920 + 16,718 + 33,380 \tag{9.16}$$

$$A_{total} = 150,930$$

€ (9.17)

Debido a convenciones de redondeo y consistencia con el modelo validado durante el proyecto, el valor utilizado en la evaluación financiera corresponde a:

$$A_{total} = 150,738$$

€ anuales (9.18)

Table 9.4: Ahorros anuales estimados

Categoría de ahorro	Ahorro anual
Ahorro de personal	56,192 €
Ahorro en inventario	27,720 €
Ahorro por reducción de superficie	16,920 €
Ahorro por relocalizaciones internas	16,718 €
Ahorro por reducción de posiciones	33,380 €
Ahorro anual utilizado en el modelo	150,738 €

Es importante señalar que el valor de 150,738 € corresponde al ahorro bruto anual estimado para el primer lift antes de descontar mantenimiento. Al restar 1,000 € de mantenimiento anual, el flujo neto para el primer lift es:

$$S_1 = 150,738 - 1,000 = 149,738$$

€ (9.19)

Este valor se utiliza como punto de partida para el modelo financiero.

9.6 Rendimientos decrecientes

Una parte fundamental de la evaluación económica consiste en reconocer que los ahorros no crecen de manera lineal con el número de lifts. El primer módulo captura los beneficios más evidentes, ya que permite consolidar materiales críticos, reducir recorridos importantes y disminuir una parte relevante de las actividades manuales. El segundo módulo agrega beneficios adicionales, pero menores que el primero. El tercero completa la configuración estratégica. El cuarto y quinto aportan principalmente holgura o redundancia adicional, pero con menor ahorro marginal.

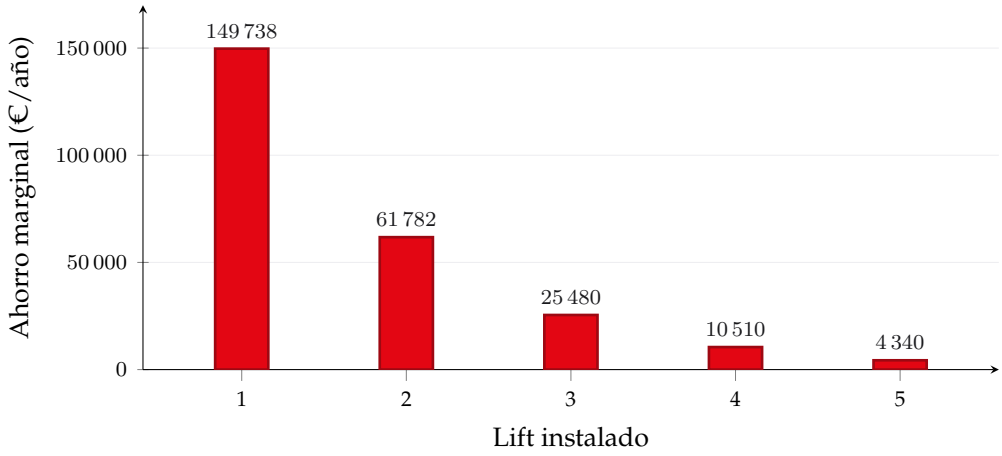


Figure 9.6: Rendimientos decrecientes: ahorro marginal aportado por cada lift adicional según los coeficientes calibrados α_i.

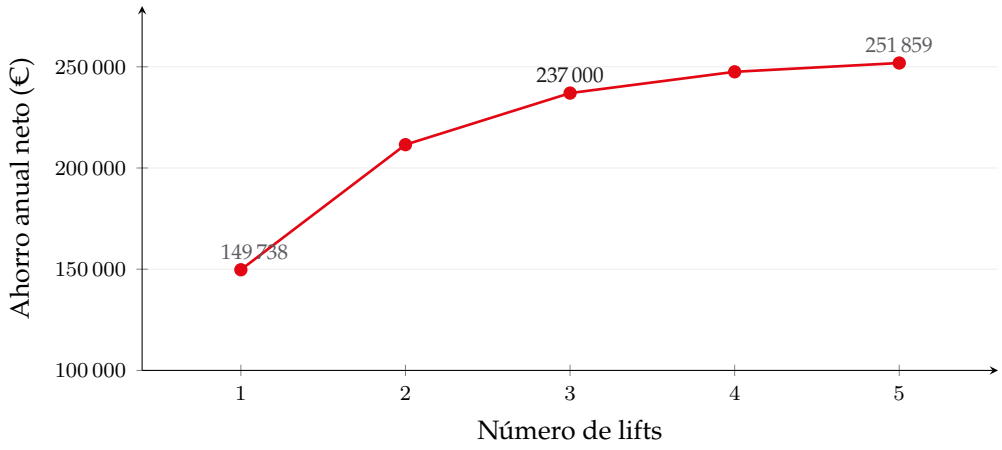


Figure 9.7: Curva de ahorros anuales netos según número de lifts: el crecimiento es cóncavo, reflejo de los rendimientos decrecientes.

Para modelar este comportamiento se utilizan coeficientes de rendimientos decrecientes (α_i):

$$\alpha = 1.0000,\ 0.4126,\ 0.1702,\ 0.0702,\ 0.0290 \tag{9.20}$$

La función de ahorro para (x) lifts se define como:

$$S(x) = S_1 \sum_{i=1}^{x} \alpha_i \tag{9.21}$$

donde $(S_1 = 149,738)$ corresponde al ahorro neto del primer lift. Estos coeficientes fueron calibrados para reproducir el valor de referencia de HYDAC para tres lifts, equivalente a 237,000 € netos anuales.

Table 9.5: Coeficientes de rendimientos decrecientes

Lift	Coeficiente (α_i)	Interpretación
1	1.0000	Captura el 100% del ahorro base
2	0.4126	Aporta 41.26% del ahorro del primer lift
3	0.1702	Aporta 17.02% del ahorro del primer lift
4	0.0702	Aporta 7.02% del ahorro del primer lift
5	0.0290	Aporta 2.90% del ahorro del primer lift

Esta formulación permite capturar una realidad importante del proyecto: más capacidad no significa necesariamente más valor económico proporcional. Después de cierto punto, el sistema ya eliminó gran parte de los desperdicios principales, por lo que cada unidad adicional genera un beneficio menor. Esta lógica será clave para explicar por qué tres lifts maximizan el VAN y por qué cuatro o cinco lifts no se recomiendan bajo el horizonte analizado.

9.7 Estructura de flujo de caja

Para cada escenario, el flujo de caja se construye considerando una inversión inicial en el año 0 y ahorros netos constantes durante los años 1 a 5. La inversión inicial se calcula como:

$$I_0(x) = x \cdot 72,837 \tag{9.22}$$

El ahorro anual se calcula mediante la función de rendimientos decrecientes:

$$S(x) = 149,738 \sum_{i=1}^{x} \alpha_i \tag{9.23}$$

El flujo neto anual para el escenario (x) se considera como:

$$CF_t(x) = S(x), \quad t = 1, 2, 3, 4, 5 \tag{9.24}$$

y el flujo inicial como:

$$CF_0(x) = -I_0(x) \tag{9.25}$$

Esta estructura permite comparar los escenarios bajo una lógica común. Todos los escenarios se evalúan en el mismo horizonte, con la misma tasa de descuento y con costos de inversión proporcionales al número de lifts. La diferencia principal entre escenarios proviene de los ahorros anuales, que crecen de manera decreciente.

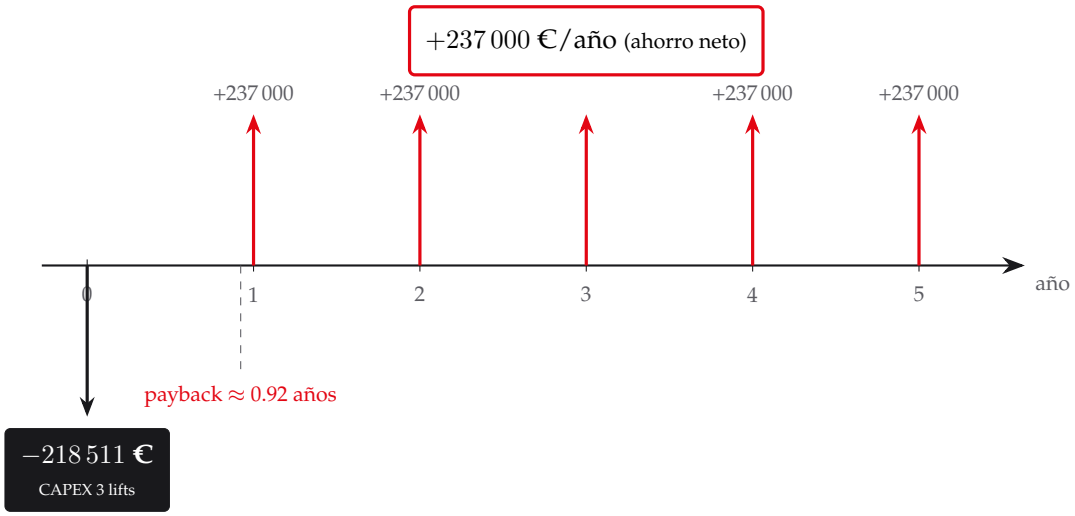


Figure 9.8: Estructura del flujo de caja del escenario recomendado (3 lifts): inversión inicial en el año 0 y ahorros netos constantes durante los años 1 a 5.

9.8 Evaluación financiera

La evaluación financiera considera cuatro indicadores principales: Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno, Retorno sobre la Inversión y Payback. Cada indicador entrega una perspectiva distinta del proyecto. El VAN mide creación de valor actual, la TIR mide rentabilidad porcentual, el ROI muestra retorno acumulado sobre la inversión y el Payback indica el tiempo de recuperación del capital invertido.

9.8.a Valor Actual Neto

El Valor Actual Neto se calcula como:

$$VAN(x) = \sum_{t=1}^{5} \frac{CF_t(x)}{(1+r)^t} - I_0(x) \tag{9.26}$$

donde (r = 8%) corresponde a la tasa de descuento. El VAN es uno de los indicadores más relevantes para esta decisión, porque permite comparar escenarios con distintos niveles de inversión y ahorro. Una configuración con mayor ahorro anual no necesariamente tiene mayor VAN si requiere un CAPEX demasiado alto.

9.8.b Tasa Interna de Retorno

La Tasa Interna de Retorno corresponde a la tasa que hace que el VAN sea igual a cero:

$$0 = \sum_{t=1}^{5} \frac{CF_t(x)}{(1+TIR)^t} - I_0(x) \tag{9.27}$$

La TIR permite evaluar la rentabilidad porcentual de cada escenario. Sin embargo, debe interpretarse con cuidado, ya que puede favorecer configuraciones pequeñas con retornos porcentuales muy altos, incluso si no cumplen completamente las restricciones operacionales.

9.8.c Retorno sobre la inversión

El ROI se calcula como:

$$ROI(x) = \frac{\sum_{t=1}^{5} CF_t(x) - I_0(x)}{I_0(x)} \cdot 100\% \tag{9.28}$$

Este indicador permite visualizar cuánto beneficio acumulado genera el proyecto en relación con la inversión realizada. Es especialmente útil para comunicación ejecutiva porque muestra la magnitud del retorno en un período determinado.

9.8.d Payback

El Payback corresponde al tiempo necesario para recuperar la inversión inicial mediante los flujos netos generados. Cuando los flujos anuales son constantes, puede estimarse como:

$$Payback(x) = \frac{I_0(x)}{CF_{anual}(x)} \tag{9.29}$$

Este indicador es relevante porque muestra la velocidad de recuperación de la inversión. En el caso de los escenarios analizados, los paybacks son bajos, lo que confirma que la automatización genera beneficios económicos significativos en comparación con la inversión inicial.

9.9 Resultados financieros por escenario

La siguiente tabla resume los resultados financieros de los escenarios de uno a cinco lifts, considerando horizonte de cinco años, tasa de descuento de 8% y rendimientos decrecientes calibrados.

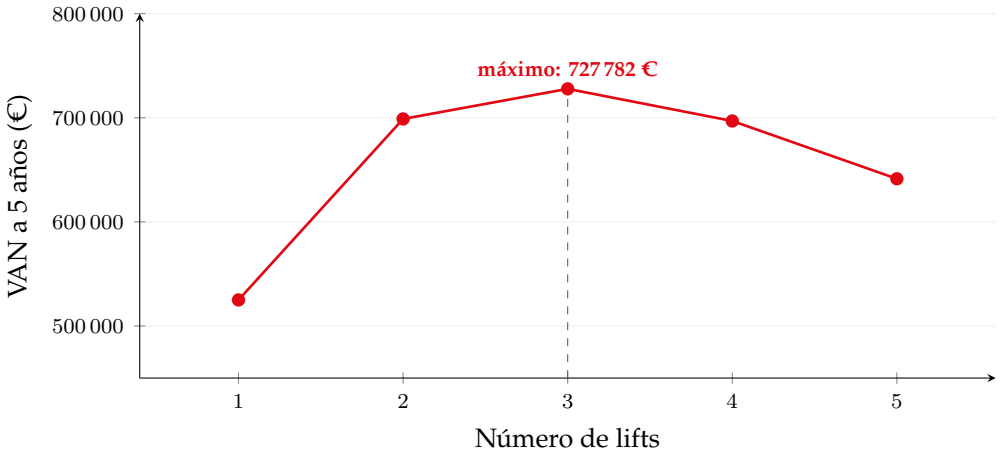


Figure 9.9: VAN por escenario: el valor presente neto crece hasta tres lifts y disminuye con la cuarta y quinta unidad.

Los resultados muestran que todos los escenarios son financieramente atractivos en términos absolutos, ya que presentan VAN positivo, TIR muy superior a la tasa de descuento y payback inferior a dos años. Sin embargo, la comparación entre escenarios muestra una diferencia importante. El VAN aumenta desde uno hasta tres lifts, alcanzando su máximo

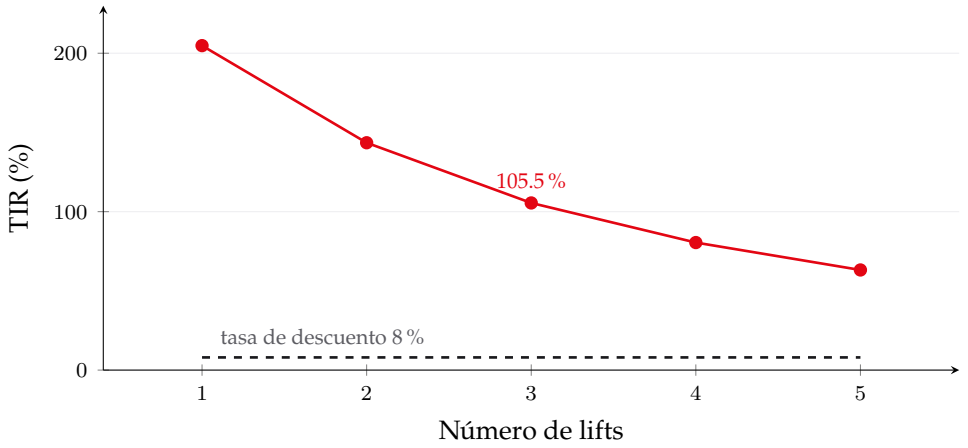


Figure 9.10: TIR por escenario: la rentabilidad porcentual disminuye con cada unidad adicional, pero permanece muy por encima de la tasa de descuento en todas las configuraciones.

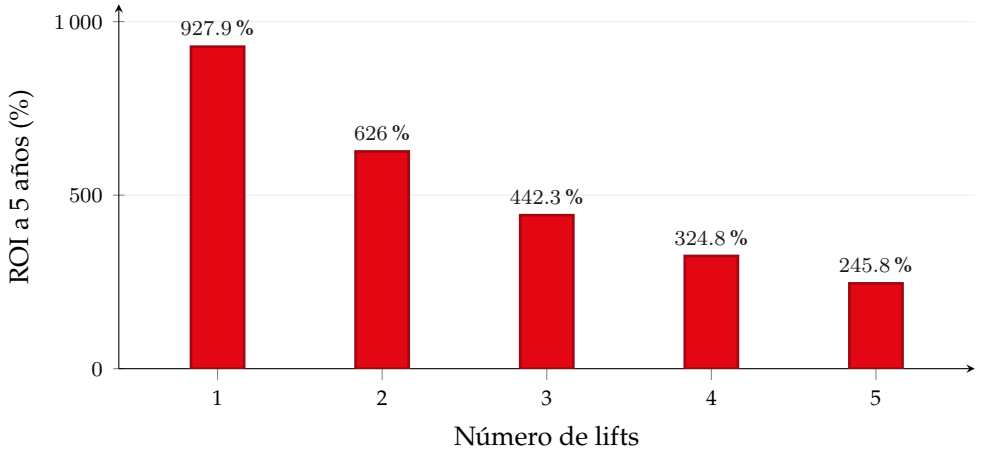


Figure 9.11: ROI acumulado a cinco años por escenario.

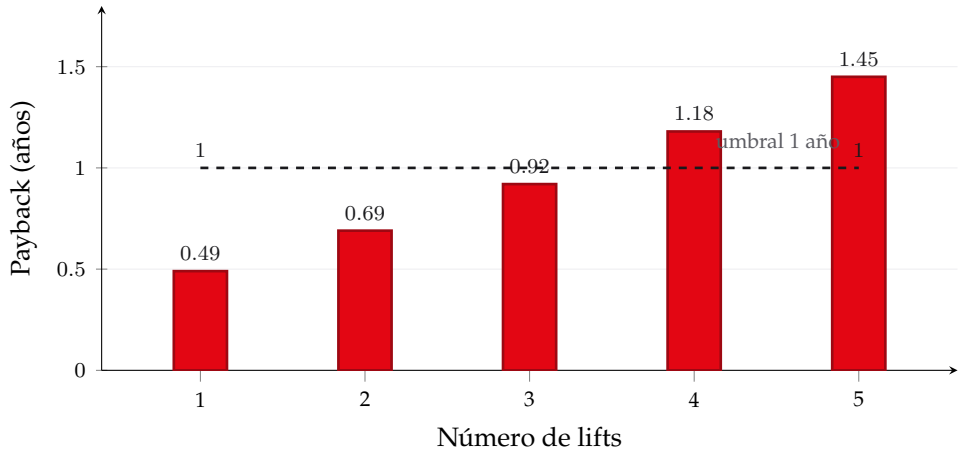


Figure 9.12: Período de recuperación de la inversión por escenario: hasta tres lifts el payback se mantiene por debajo de un año.

Table 9.6: Resultados financieros por escenario

Lifts	Inversión	Ahorro anual	VAN	TIR	Payback
1	72,837 €	149,738 €	525,023 €	204.8%	0.49 años
2	145,674 €	211,520 €	698,864 €	143.5%	0.69 años
3	218,511 €	237,000 €	727,782 €	105.5%	0.92 años
4	291,348 €	247,517 €	696,915 €	80.5%	1.18 años
5	364,185 €	251,859 €	641,416 €	63.2%	1.45 años

Table 9.7: ROI a cinco años por escenario

Escenario	ROI a 5 años
1 lift	927.9%
2 lifts	626.0%
3 lifts	442.3%
4 lifts	324.8%
5 lifts	245.8%

en el escenario de tres unidades. Luego disminuye en los escenarios de cuatro y cinco lifts, a pesar de que los ahorros anuales siguen aumentando. Esto ocurre porque los ahorros marginales adicionales no compensan suficientemente el CAPEX incremental.

La TIR disminuye de forma continua a medida que aumenta el número de lifts. Esto es esperado en presencia de rendimientos decrecientes. El primer lift tiene una TIR extremadamente alta porque requiere baja inversión relativa y captura los principales ahorros. Al agregar más unidades, la inversión crece linealmente mientras los beneficios aumentan cada vez menos. Aun así, la TIR del escenario de tres lifts sigue siendo muy alta, superior al 100%, lo que muestra que la configuración recomendada mantiene una rentabilidad excepcional.

El ROI también disminuye con el número de unidades, pero se mantiene en niveles muy altos. Esto confirma que incluso la configuración de tres lifts multiplica significativamente el capital invertido en el horizonte de cinco años. El hecho de que el ROI de un lift sea mayor no significa que un lift sea la mejor decisión estratégica, porque ese escenario no cumple completamente las restricciones de capacidad, redundancia y consolidación.

9.10 Análisis del escenario recomendado

El escenario de tres lifts presenta una inversión total de 218,511 €, un ahorro anual neto de 237,000 €, un VAN aproximado de 727,782 €, una TIR de 105.5%, un ROI a cinco años de 442.3% y un payback de 0.92 años. Estos resultados lo convierten en la alternativa con mayor VAN dentro de los escenarios evaluados.

Desde el punto de vista financiero, tres lifts representan el punto donde la inversión adicional todavía genera suficiente valor para justificar el CAPEX. El tercer lift no tiene el mismo impacto marginal que el primero o el segundo, pero permite alcanzar la configuración estratégica y operacionalmente robusta. Además, el VAN máximo indica que, bajo los supuestos del modelo, esta alternativa crea más valor presente que las configuraciones de uno, dos, cuatro o cinco lifts.

Desde el punto de vista operacional, tres lifts permiten consolidar CX y FSA/FSK, reducir dependencia de F009, distribuir materiales de alta rotación y entregar mayor

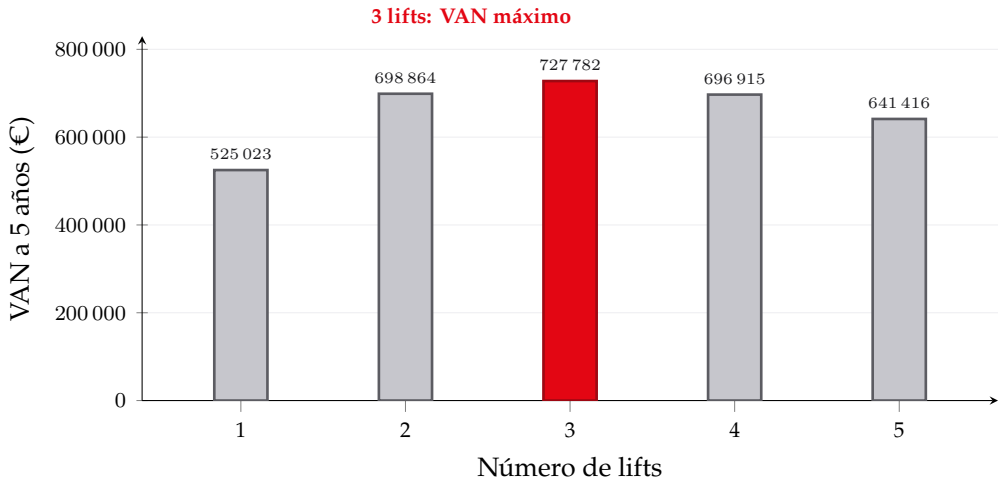


Figure 9.13: Comparación del VAN entre escenarios, destacando el máximo alcanzado con tres lifts.

redundancia. Esta interpretación es importante porque el escenario financiero puro no debe separarse del modelo de capacidad. Una configuración puede tener indicadores porcentuales mejores, como ocurre con un lift, pero no resolver el problema industrial completo. Tres lifts equilibran rentabilidad, capacidad y estrategia.

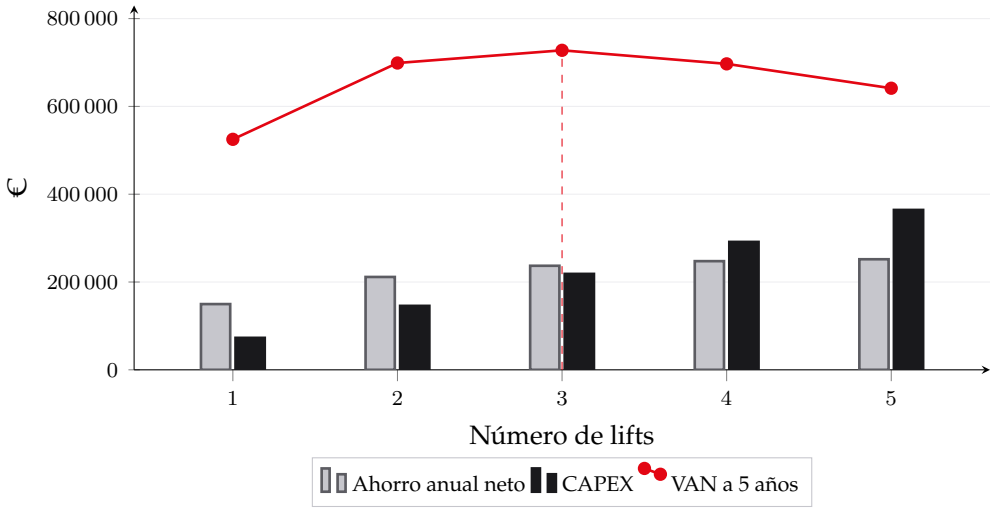


Figure 9.14: Vista combinada de ahorro anual, CAPEX y VAN por escenario: en tres lifts el ahorro aún supera con holgura el costo incremental y el VAN alcanza su máximo.

9.11 Comparación entre escenarios

La comparación entre escenarios permite interpretar el comportamiento económico de la inversión. El escenario de un lift es financieramente muy atractivo, pero operacionalmente insuficiente. El escenario de dos lifts mejora capacidad y mantiene indicadores financieros muy altos, pero todavía no entrega la robustez estratégica necesaria. El escenario de tres lifts alcanza el mayor VAN y cumple los requerimientos operacionales. Los escenarios de cuatro y cinco lifts agregan capacidad, pero entran en una zona de menor beneficio marginal.

Table 9.8: Interpretación económica y operacional de escenarios

Escenario	Lectura económica	Lectura operacional
1 lift	Máxima TIR y ROI, payback muy bajo	Insuficiente para consolidación robusta y sin redundancia
2 lifts	Alto VAN y fuerte mejora marginal	Mejora relevante, pero limitada para eliminar F009 y absorber picos
3 lifts	Máximo VAN y payback menor a un año	Configuración recomendada por balance económico y operacional
4 lifts	VAN comienza a disminuir	Holgura adicional, pero menor justificación marginal
5 lifts	Menor VAN entre configuraciones mayores	Riesgo de sobredimensionamiento bajo el horizonte evaluado

El punto más importante de esta comparación es que la decisión óptima no coincide necesariamente con el mayor ROI o la mayor TIR. Si el criterio fuera únicamente maximizar TIR, un lift sería la mejor opción. Si el criterio fuera solo aumentar capacidad, cinco lifts podrían parecer atractivos. Sin embargo, una decisión industrial debe equilibrar rentabilidad, capacidad, operación y estrategia. Bajo esa lógica, tres lifts representan la alternativa más completa.

9.12 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad permite entender cómo podrían cambiar los resultados si se modifican algunos supuestos relevantes. En este capítulo se propone analizar especialmente tres variables: ahorro anual, tasa de descuento e inversión por lift. Estas variables son críticas porque afectan directamente el VAN, la TIR y el payback.

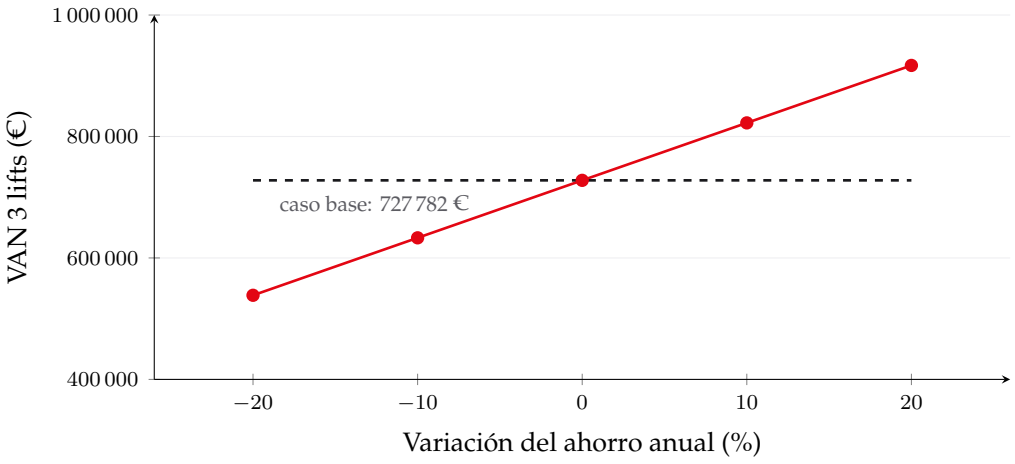


Figure 9.15: Sensibilidad del VAN del escenario recomendado ante variaciones del ahorro anual: incluso con $-20\,\%$ de ahorro el proyecto mantiene un VAN superior a 500 000 €.

9.12.a Sensibilidad al ahorro anual

El ahorro anual es la variable más importante del modelo, porque determina los flujos de caja futuros. Si los ahorros reales fueran menores a los estimados, el VAN disminuiría y el

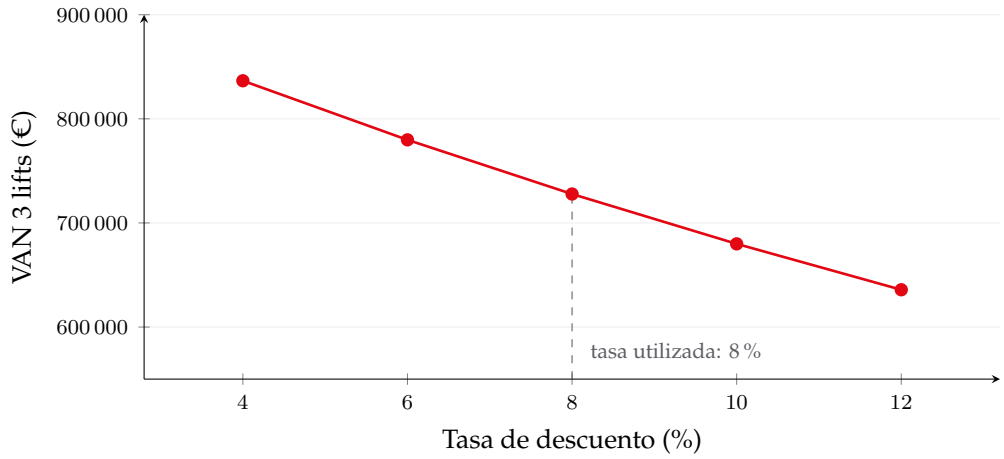


Figure 9.16: Sensibilidad del VAN del escenario recomendado ante la tasa de descuento: la rapidez de recuperación hace al proyecto poco sensible a este parámetro.

payback aumentaría. Si los ahorros fueran mayores, el proyecto sería aún más atractivo. Sin embargo, dado que el escenario de tres lifts presenta un VAN elevado y payback inferior a un año, existe un margen razonable para absorber desviaciones sin que la inversión deje de ser conveniente.

9.12.b Sensibilidad a la tasa de descuento

La tasa de descuento afecta el valor presente de los flujos futuros. Una tasa mayor reduce el VAN, mientras que una tasa menor lo aumenta. En proyectos con payback muy corto, como este, la sensibilidad a la tasa de descuento suele ser menor que en proyectos donde los beneficios aparecen mucho más tarde. Esto se debe a que una parte importante del valor se recupera rápidamente durante el primer año de operación.

9.12.c Sensibilidad al CAPEX

El CAPEX por lift también puede variar según negociación con proveedor, costos de instalación, transporte, integración o ajustes de layout. Si el CAPEX aumenta, el VAN disminuye y el payback se alarga. Sin embargo, debido a la magnitud de los ahorros estimados, el escenario de tres lifts mantiene una posición financieramente robusta incluso ante aumentos moderados de inversión. De todos modos, esta variable debe ser monitoreada durante el proceso final de inversión.

9.13 Interpretación estratégica de los resultados

La evaluación técnico-económica confirma que la automatización propuesta no solo es operacionalmente necesaria, sino también financieramente atractiva. El resultado más importante no es únicamente que el proyecto tenga VAN positivo, sino que el escenario recomendado de tres lifts maximiza el valor presente entre las alternativas evaluadas y mantiene indicadores financieros muy superiores a criterios tradicionales de inversión.

Desde una mirada estratégica, tres lifts permiten capturar el valor económico de la automatización sin caer en sobredimensionamiento. Un lift permite recuperar rápidamente la inversión, pero no entrega una solución completa. Dos lifts mejoran la operación,

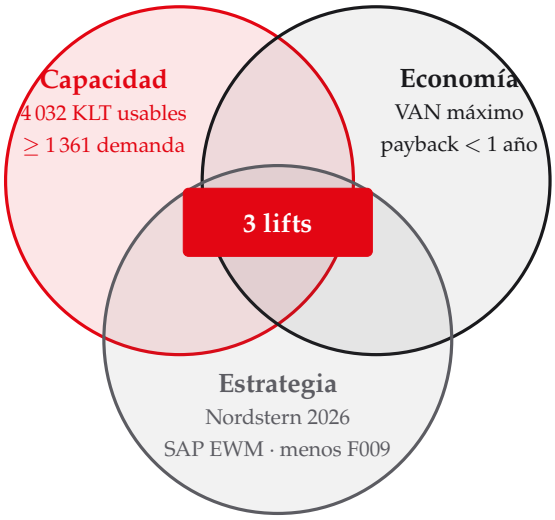


Figure 9.17: El escenario de tres lifts como intersección de los criterios de capacidad, economía y estrategia.

pero pueden ser insuficientes frente a los objetivos de consolidación y crecimiento. Cuatro y cinco lifts agregan capacidad, pero con beneficio marginal decreciente. Tres lifts representan el punto en que las curvas financiera, operacional y estratégica se cruzan.

Además, la evaluación muestra que parte del valor del proyecto no se refleja completamente en indicadores financieros directos. Beneficios como reducción de riesgo operacional, mejora ergonómica, mayor trazabilidad, preparación para SAP EWM y menor dependencia de F009 son difíciles de capturar completamente en un flujo de caja, pero son relevantes para la decisión industrial. Por ello, la recomendación de tres lifts se fortalece al combinar los resultados financieros con los resultados del modelamiento de capacidad.

9.14 Síntesis del capítulo

La evaluación técnico-económica permitió cuantificar la conveniencia de implementar módulos Modula ML50D en HYDAC Werk 12. El análisis consideró inversión inicial, mantenimiento, ahorros anuales, rendimientos decrecientes, flujos de caja e indicadores financieros para escenarios de uno a cinco lifts.

El ahorro anual bruto del primer lift se estimó en 150,738 €, compuesto por ahorro de personal, ahorro en inventario, reducción de superficie, reducción de relocalizaciones internas y reducción de posiciones de almacenamiento. Al descontar mantenimiento, el ahorro neto del primer lift corresponde a 149,738 €. A partir de este valor y de la calibración con el benchmark de tres lifts, se evaluaron los escenarios mediante VAN, TIR, ROI y payback.

Los resultados muestran que todos los escenarios son económicamente atractivos, pero el escenario de tres lifts alcanza el mayor VAN, con aproximadamente 727,782 €, una TIR de 105.5%, un ROI de 442.3% y un payback de 0.92 años. Además, esta configuración cumple mejor los requerimientos operacionales y estratégicos definidos en los capítulos anteriores.

En consecuencia, desde la perspectiva técnico-económica, tres Modula ML50D representan la configuración recomendada. Esta conclusión será formalizada en el capítulo



Figure 9.18: Resumen de los indicadores financieros del escenario recomendado de tres Modula ML50D.

siguiente mediante un modelo de optimización discreta, donde se incorporan explícitamente la función objetivo, las restricciones de capacidad, los rendimientos decrecientes y la comparación entre óptimos financieros factibles bajo condiciones reales de operación.

10 Modelo de Optimización

10.1 Introducción

El modelo de optimización constituye el núcleo cuantitativo de esta memoria, ya que permite formalizar la decisión sobre el número de módulos Modula ML50D que HYDAC debería instalar en Werk 12. En los capítulos anteriores se demostró que el sistema actual presenta restricciones de capacidad, dispersión de materiales, dependencia de F009, altos volúmenes de movimientos 261 hacia producción y necesidad de integración futura con SAP EWM. También se mostró que los módulos verticales Modula ML50D son una alternativa técnica y económicamente atractiva. Sin embargo, todavía queda una pregunta central: cuántos módulos instalar.

Esta pregunta no puede responderse simplemente diciendo que más módulos entregan más capacidad. En proyectos de automatización industrial, instalar más equipos aumenta la capacidad nominal, pero también aumenta el CAPEX, el mantenimiento, la complejidad del sistema y el riesgo de sobredimensionamiento. Además, los beneficios económicos no crecen de manera lineal, porque los primeros módulos capturan los ahorros más relevantes, mientras que las unidades adicionales aportan beneficios marginales cada vez menores. Esta lógica se conoce como rendimientos decrecientes.

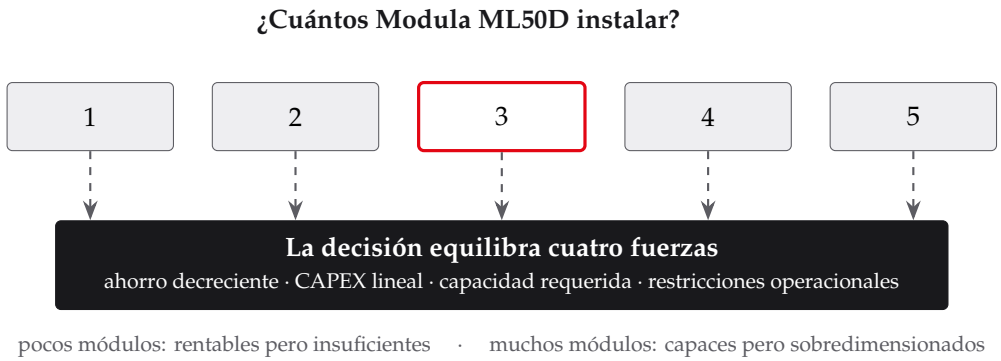


Figure 10.1: Formulación conceptual del problema de optimización: elegir el número entero de módulos que equilibra ahorro, costo, capacidad y operación.

El objetivo de este capítulo es construir un modelo matemático que permita determinar la configuración óptima considerando simultáneamente valor económico, capacidad, crecimiento, restricciones operacionales y alineación estratégica con Nordstern 2026. La idea no es reemplazar el juicio de gestión, sino entregar una herramienta estructurada que permita justificar la decisión de inversión de forma transparente y defendible.

El modelo se desarrolla en tres niveles. Primero, se formula el problema de decisión y se definen variables, parámetros y restricciones. Segundo, se construye una función objetivo basada en Valor Actual Neto, incorporando rendimientos decrecientes. Tercero, se interpreta el resultado desde una perspectiva gerencial, mostrando por qué tres módulos Modula ML50D representan el mejor equilibrio entre beneficio económico, factibilidad operacional y robustez estratégica.

10.2 Planteamiento del problema

La decisión principal consiste en seleccionar el número de módulos Modula ML50D a instalar en Werk 12. Esta decisión es discreta, ya que HYDAC no puede instalar 2.4 módulos o 3.7 módulos, sino una cantidad entera de unidades. Por esta razón, el problema corresponde naturalmente a un problema de optimización discreta.

La variable de decisión principal se define como:

$$x \in 0, 1, 2, 3, 4, 5 \tag{10.1}$$

donde (x) representa el número de módulos Modula ML50D instalados.

El límite superior de cinco módulos se define por alcance del proyecto, disponibilidad física esperada, horizonte de análisis y necesidad de comparar escenarios razonables para Werk 12. El valor (x=0) representa el caso sin inversión, mientras que los valores (x=1,. . . ,5) representan configuraciones crecientes de automatización.

El problema debe equilibrar cuatro dimensiones:

1. Valor económico generado por los ahorros operacionales.
2. Costo de inversión asociado a la compra de los módulos.
3. Capacidad de almacenamiento necesaria para consolidar CX y FSA/FSK.
4. Restricciones operacionales asociadas a crecimiento, fast movers, redundancia y reducción de F009.

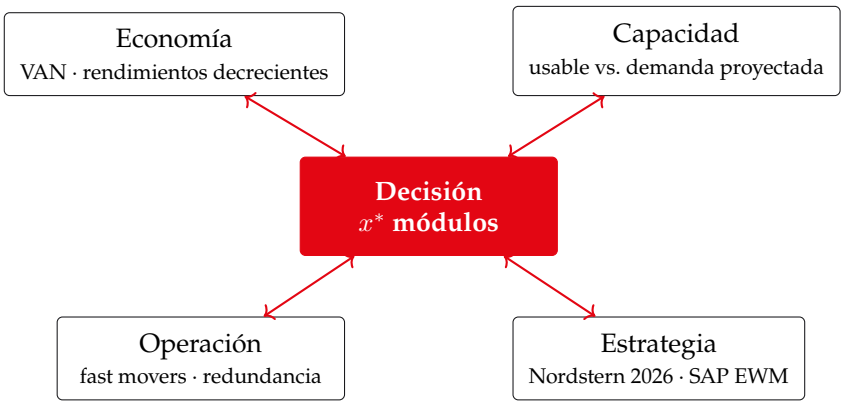


Figure 10.2: Dimensiones integradas en el modelo de optimización: económica, de capacidad, operacional y estratégica.

La dificultad del problema está en que estas dimensiones no siempre apuntan a la misma decisión. Por ejemplo, un módulo puede entregar una rentabilidad porcentual muy alta, pero no resolver la capacidad operacional. Cinco módulos pueden entregar

máxima holgura, pero con menor retorno marginal. Por lo tanto, la configuración óptima debe ubicarse en el punto donde la inversión adicional todavía genera suficiente valor y al mismo tiempo cumple con las restricciones reales del sistema.

10.3 Variables de decisión

Para formular el modelo de manera más flexible, se introducen variables binarias (y_i), donde cada variable indica si el módulo marginal (i) es instalado o no:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{si el módulo } i \text{ es instalado} \\ 0, & \text{si el módulo } i \text{ no es instalado} \end{cases} \qquad i = 1, \ldots, 5 \tag{10.2}$$

El número total de módulos instalados se obtiene como:

$$x = \sum_{i=1}^{5} y_i \tag{10.3}$$

Para mantener coherencia con la lógica de rendimientos decrecientes, se incorpora una restricción secuencial. Esta restricción evita que el modelo seleccione, por ejemplo, el cuarto módulo sin haber seleccionado antes el primero, segundo y tercero. Matemáticamente:

$$y_{i+1} \leq y_i \quad \forall i = 1, \ldots, 4 \tag{10.4}$$

Esta condición permite interpretar los coeficientes marginales de ahorro de manera ordenada. El primer módulo captura el mayor ahorro, el segundo captura el segundo mayor ahorro, el tercero captura el tercer ahorro marginal, y así sucesivamente.

Table 10.1: Variables de decisión del modelo

Variable	Descripción
(y_i)	Variable binaria que indica si el módulo marginal (i) es instalado
(x)	Número total de módulos instalados, calculado como $(\sum_{i=1}^{5} y_i)$

10.4 Parámetros del modelo

Los parámetros del modelo provienen de los capítulos anteriores y del análisis realizado durante el proyecto. Se consideran valores económicos, técnicos y operacionales. La siguiente tabla resume los parámetros principales.

El requerimiento operacional de diseño (D_{op}) no representa solamente el footprint físico actual. Representa una capacidad de diseño más robusta, que considera crecimiento Nordstern 2026, holgura operacional, separación de fast movers, reducción de F009, redundancia y estabilidad de picking. Esta distinción es muy importante, porque el footprint base de CX y FSA/FSK puede ser cubierto físicamente por menos unidades, pero la operación real exige más que capacidad nominal.

El factor de anualidad descontada se define como:

Table 10.2: Parámetros principales del modelo de optimización

Parámetro	Símbolo	Valor
Inversión por lift	(C_{lift})	72,837 €
Ahorro neto del primer lift	(S_1)	149,738 €/año
Horizonte de evaluación	(T)	5 años
Tasa de descuento	(r)	8%
Capacidad nominal por lift	(K_{lift})	1,680 KLT
Capacidad usable por lift	(K_{usable})	1,344 KLT
Número máximo de lifts	(N)	5
Requerimiento operacional de diseño	(D_{op})	4,000 KLT aprox.

$$A(r,T) = \sum_{t=1}^{T} \frac{1}{(1+r)^t} \tag{10.5}$$

Con (r=8%) y (T=5), se obtiene:

$$A(0.08, 5) \approx 3.9927 \tag{10.6}$$

Este factor permite convertir un ahorro anual constante en valor presente.

10.5 Función de ahorros con rendimientos decrecientes

La función de ahorros se construye considerando que cada módulo adicional genera un beneficio marginal menor. Este supuesto refleja la lógica operacional del proyecto: el primer módulo captura los beneficios más evidentes, el segundo mejora la operación, el tercero completa la configuración estratégica, y el cuarto o quinto aportan principalmente holgura adicional con menor impacto económico.

Los coeficientes marginales se definen como:

$$\alpha = 1.0000,\ 0.4126,\ 0.1702,\ 0.0702,\ 0.0290 \tag{10.7}$$

Por lo tanto, el ahorro anual total para una configuración (x) se calcula como:

$$S(x) = S_1 \sum_{i=1}^{5} \alpha_i y_i \tag{10.8}$$

donde $(S_1 = 149,738)$ €/año.

Table 10.3: Ahorro marginal por módulo instalado

Módulo	Coeficiente (α_i)	Ahorro marginal aproximado
1	1.0000	149,738 €/año
2	0.4126	61,780 €/año
3	0.1702	25,480 €/año
4	0.0702	10,510 €/año
5	0.0290	4,340 €/año

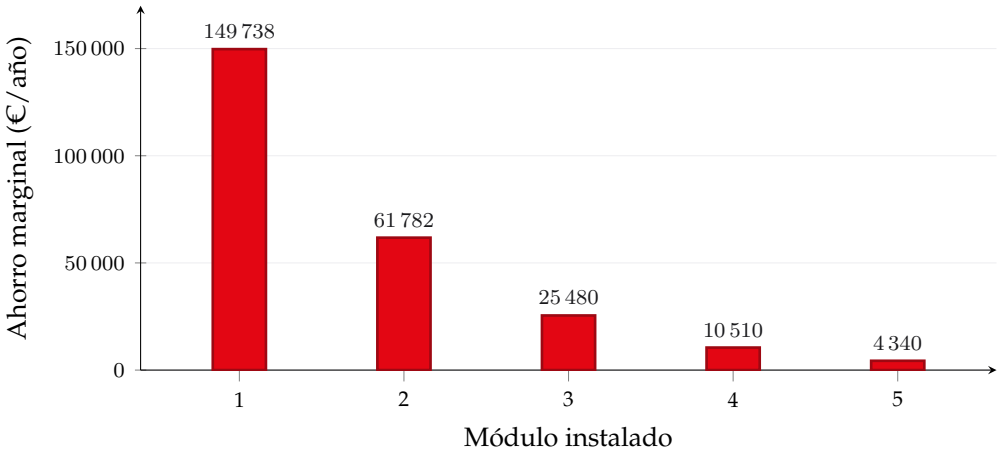


Figure 10.3: Ahorro marginal por módulo instalado: la esencia económica del problema de optimización.

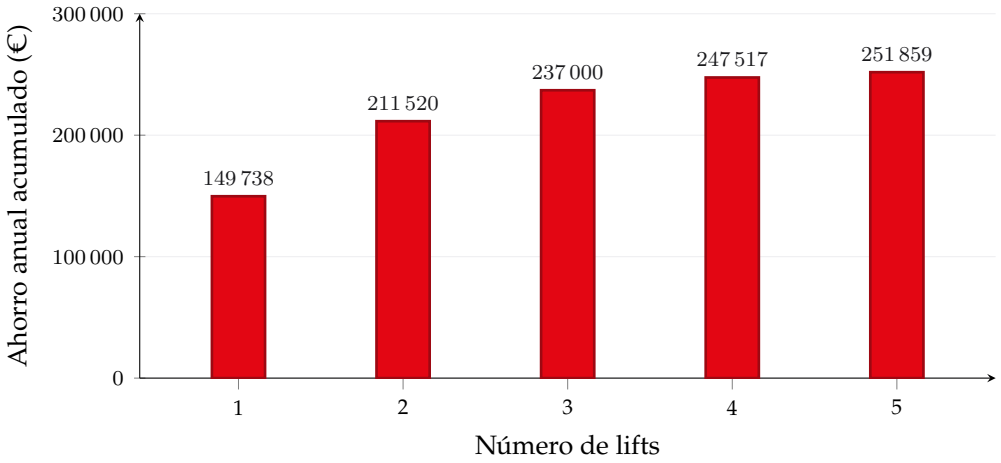


Figure 10.4: Ahorro anual neto acumulado según el número de lifts instalados: crecimiento cóncavo por rendimientos decrecientes.

La tabla anterior muestra la esencia económica del problema. El segundo módulo todavía aporta un beneficio marginal alto. El tercer módulo aporta un beneficio menor, pero todavía relevante. El cuarto y quinto módulo, en cambio, agregan ahorros significativamente más bajos. Esta caída explica por qué el modelo no recomienda seguir instalando módulos indefinidamente.

10.6 Restricciones del modelo

El modelo considera restricciones de selección, capacidad y factibilidad operacional.

10.6.a Restricción de número máximo de módulos

El número de módulos instalados no puede superar el máximo definido para el proyecto:

$$\sum_{i=1}^{5} y_i \leq 5 \tag{10.9}$$

10.6.b Restricción de capacidad operacional

La capacidad usable total debe ser suficiente para cumplir el requerimiento operacional de diseño:

$$K_{usable} \sum_{i=1}^{5} y_i \geq D_{op} \tag{10.10}$$

Sustituyendo los valores:

$$1,344 \sum_{i=1}^{5} y_i \geq 4,000 \tag{10.11}$$

Esta restricción implica:

$$\sum_{i=1}^{5} y_i \geq 2.976 \tag{10.12}$$

Como el número de módulos debe ser entero:

$$x \geq 3 \tag{10.13}$$

Por lo tanto, bajo el criterio operacional robusto, al menos tres módulos son necesarios.

10.6.c Restricción secuencial

Para mantener la lógica de selección marginal:

$$y_{i+1} \leq y_i \quad \forall i = 1, \ldots, 4 \tag{10.14}$$

10.6.d Naturaleza binaria

Cada variable debe ser binaria:

$$y_i \in 0,1 \quad \forall i = 1,\ldots,5 \tag{10.15}$$

10.7 Función objetivo

La función objetivo busca maximizar el Valor Actual Neto del proyecto. Para una configuración determinada, el beneficio presente de los ahorros se calcula multiplicando el ahorro anual por el factor de anualidad descontada. Luego se resta la inversión inicial.

La función objetivo queda definida como:

$$\max Z = A(r,T) \cdot S_1 \sum_{i=1}^{5} \alpha_i y_i - C_{lift} \sum_{i=1}^{5} y_i \tag{10.16}$$

Sustituyendo valores:

$$\max Z = 3.9927 \cdot 149,738 \sum_{i=1}^{5} \alpha_i y_i - 72,837 \sum_{i=1}^{5} y_i \tag{10.17}$$

Esta formulación permite comparar de manera directa el valor presente de los ahorros generados por cada módulo con el costo de inversión requerido. La configuración óptima será aquella que maximice el valor económico, siempre que cumpla la capacidad operacional mínima y las restricciones del sistema.

10.8 Formulación MIP completa

La formulación completa del modelo de programación entera mixta queda:

$$\max \quad Z = A(r,T) \cdot S_1 \sum_{i=1}^{5} \alpha_i y_i - C_{lift} \sum_{i=1}^{5} y_i \tag{10.18}$$

$$\text{s.a.} \quad K_{usable} \sum_{i=1}^{5} y_i \geq D_{op} \tag{10.19}$$

$$\sum_{i=1}^{5} y_i \leq 5 \tag{10.20}$$

$$y_{i+1} \leq y_i \quad \forall i = 1,\ldots,4 \tag{10.21}$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i = 1,\ldots,5 \tag{10.22}$$

Esta formulación es lineal en las variables binarias, por lo que puede resolverse con solvers estándar de programación entera mixta. Además, es suficientemente simple para ser explicada a una audiencia de gestión y suficientemente rigurosa para justificar la decisión desde el punto de vista académico.

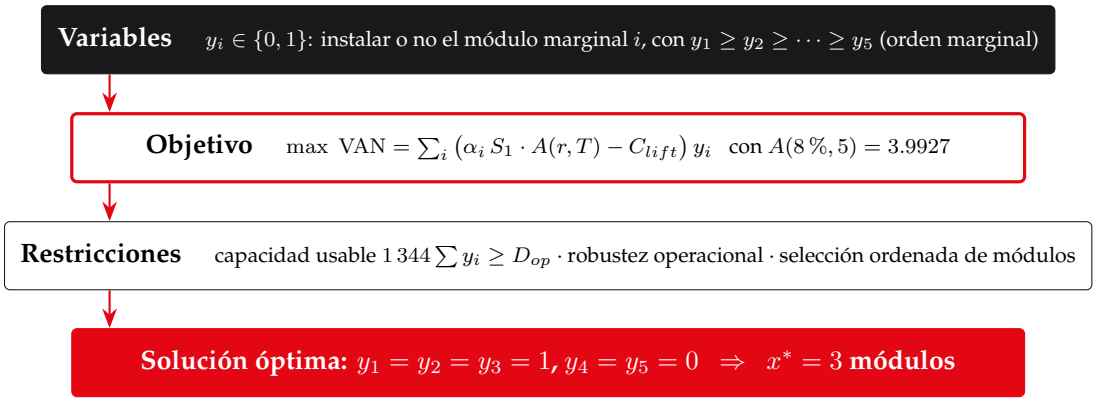


Figure 10.5: Esquema de la formulación MIP: variables binarias ordenadas, función objetivo con rendimientos decrecientes y restricciones de capacidad y operación.

10.9 Criterio marginal de decisión

Además de la formulación MIP, se propone un criterio marginal que permite explicar de forma muy intuitiva por qué el tercer lift se justifica y el cuarto no. Este criterio compara el ahorro marginal anual de cada lift adicional con el ahorro anual mínimo necesario para justificar su inversión.

El ahorro marginal mínimo requerido se obtiene dividiendo la inversión por lift por el factor de anualidad descontada:

$$\Delta S_{min} = \frac{C_{lift}}{A(r,T)} \tag{10.23}$$

Sustituyendo:

$$\Delta S_{min} = \frac{72,837}{3.9927} \tag{10.24}$$

$$\Delta S_{min} \approx 18,244\ €/\text{año} \tag{10.25}$$

Esto significa que, para que un lift adicional sea financieramente justificable en valor presente, debe generar al menos 18,244 € anuales de ahorro marginal.

Table 10.4: Comparación entre ahorro marginal y umbral mínimo requerido

Módulo adicional	Ahorro marginal	Umbral mínimo	Decisión marginal
1	149,738 €/año	18,244 €/año	Justifica ampliamente
2	61,780 €/año	18,244 €/año	Justifica ampliamente
3	25,480 €/año	18,244 €/año	Justifica
4	10,510 €/año	18,244 €/año	No justifica financieramente
5	4,340 €/año	18,244 €/año	No justifica financieramente

Este resultado es muy importante. Muestra que el tercer lift todavía genera un ahorro marginal superior al mínimo requerido para justificar su inversión, mientras que el cuarto lift queda por debajo del umbral. Por lo tanto, desde una perspectiva marginal descontada, la decisión económicamente racional es instalar hasta tres módulos y detener la inversión antes del cuarto.

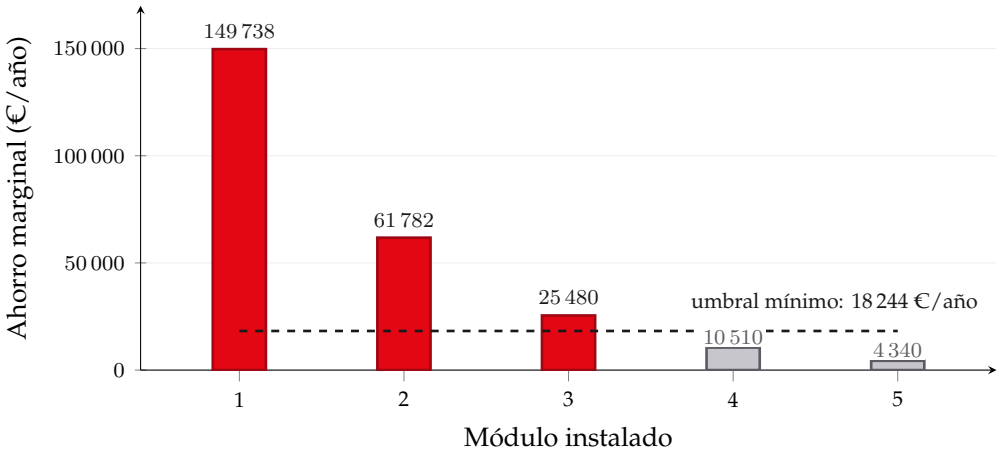


Figure 10.6: Criterio marginal de decisión: el tercer lift (25 480 €/año) aún supera el umbral mínimo de 18 244 €/año; el cuarto y el quinto quedan por debajo.

Esta prueba fortalece la recomendación porque no depende solamente de observar una tabla de VAN. Permite explicar la lógica económica del punto óptimo: el tercer módulo es el último que todavía crea valor marginal suficiente, mientras que el cuarto ya entra en una zona de sobredimensionamiento financiero.

10.10 Resultados del modelo

Al evaluar los escenarios de uno a cinco módulos, se obtienen los siguientes resultados:

Table 10.5: Resultados del modelo de optimización por escenario

Escenario	Capacidad usable	Ahorro anual	VAN	Factible	Decisión
1 lift	1,344 KLT	149,738 €	525,023 €	No	Insuficiente
2 lifts	2,688 KLT	211,520 €	698,864 €	No	No cumple (D_{op})
3 lifts	4,032 KLT	237,000 €	727,782 €	Sí	Óptimo
4 lifts	5,376 KLT	247,517 €	696,915 €	Sí	Sobredimensionado
5 lifts	6,720 KLT	251,859 €	641,416 €	Sí	Sobredimensionado

La tabla muestra que uno y dos lifts presentan indicadores financieros atractivos, pero no cumplen el requerimiento operacional robusto de diseño. Tres lifts es el primer escenario factible bajo la restricción de capacidad operacional y, además, es el que maximiza el VAN. Cuatro y cinco lifts también son factibles, pero tienen menor VAN debido a rendimientos decrecientes y mayor CAPEX.

Por lo tanto, el resultado del modelo es:

$$x^\star = 3 \tag{10.26}$$

$$y^\star = (1, 1, 1, 0, 0) \tag{10.27}$$

Esto significa que la configuración óptima consiste en instalar los tres primeros módulos y no instalar el cuarto ni el quinto bajo el horizonte y supuestos analizados.

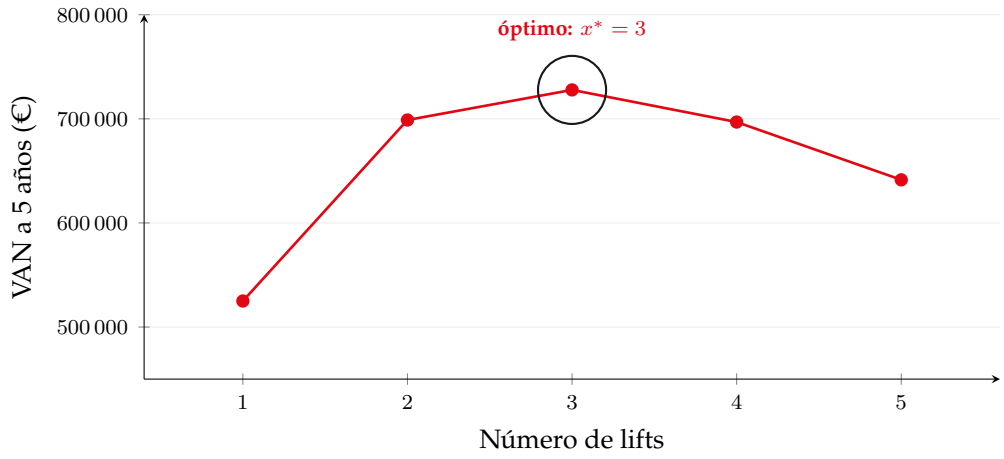


Figure 10.7: VAN en función del número de lifts: máximo global en la configuración de tres módulos.

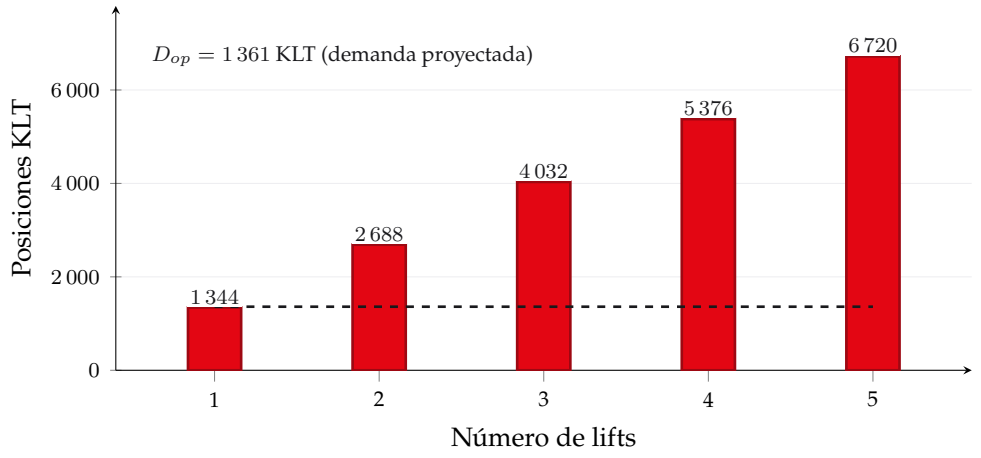
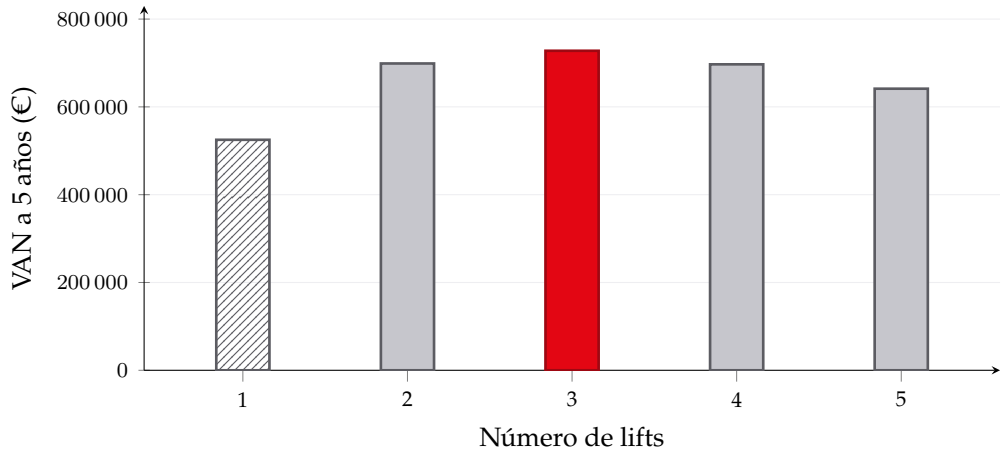


Figure 10.8: Capacidad usable por escenario frente al requerimiento operacional D_{op}: un lift es infactible bajo el criterio conservador.



barra rayada: financieramente atractivo pero operacionalmente infactible
barra roja: óptimo factible (máximo VAN cumpliendo restricciones)

Figure 10.9: Combinación de VAN y factibilidad operacional: el óptimo sin restricciones no coincide con el óptimo factible, que corresponde a tres lifts.

10.11 Análisis de dominancia

El análisis de dominancia permite comparar escenarios y descartar alternativas que son inferiores bajo criterios relevantes. En este caso, los escenarios de cuatro y cinco lifts quedan dominados por el escenario de tres lifts desde el punto de vista financiero, porque requieren mayor inversión y generan menor VAN.

Table 10.6: Incremento de VAN entre escenarios consecutivos

Transición	Cambio en VAN	Interpretación
1 a 2 lifts	+173,841 €	La segunda unidad agrega valor significativo
2 a 3 lifts	+28,918 €	La tercera unidad aún agrega valor
3 a 4 lifts	-30,867 €	La cuarta unidad destruye valor marginal
4 a 5 lifts	-55,499 €	La quinta unidad profundiza el sobredimensionamiento

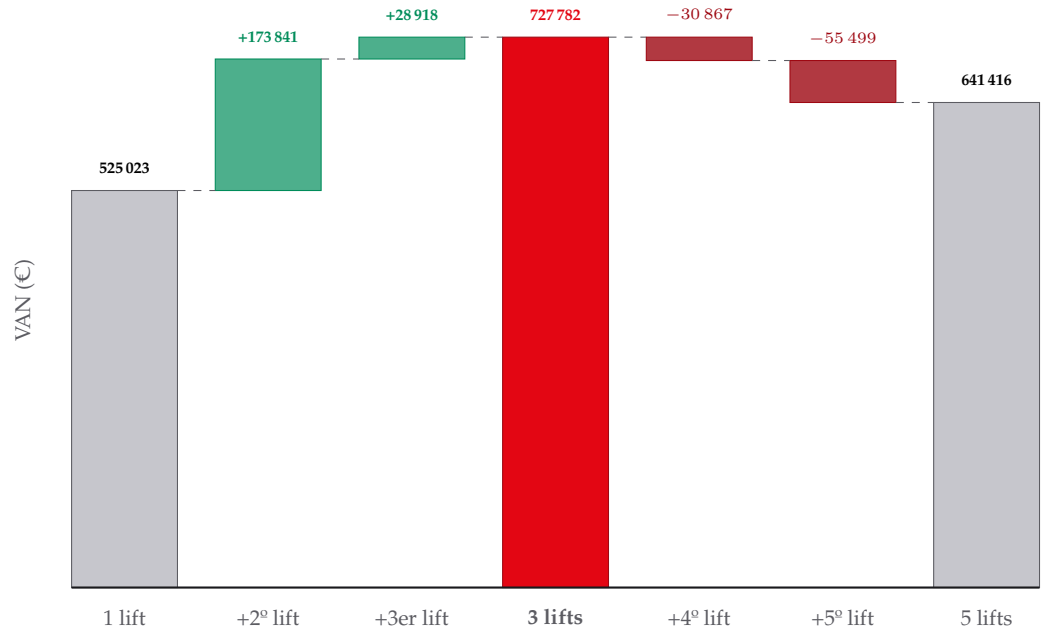


Figure 10.10: Waterfall del VAN entre escenarios: el segundo y tercer lift agregan valor, mientras el cuarto y el quinto lo destruyen.

El análisis muestra que el VAN aumenta hasta tres lifts y luego disminuye. Esta es una evidencia directa de rendimientos decrecientes. Mientras los beneficios marginales superan el costo marginal descontado, el VAN crece. Cuando los beneficios marginales caen por debajo del costo marginal, el VAN disminuye.

En términos simples, el cuarto lift no es malo porque no genere ahorro. De hecho, sí genera ahorro adicional. El problema es que ese ahorro adicional no es suficiente para justificar la inversión incremental. Esto es una distinción muy importante para la toma de decisiones, porque evita confundir ahorro absoluto con creación de valor.

10.12 Interpretación operacional

Desde la perspectiva operacional, el resultado de tres lifts es coherente con los hallazgos del diagnóstico y del modelamiento de capacidad. Una unidad no entrega robustez

suficiente, dos unidades mejoran la operación pero no alcanzan el nivel requerido para consolidación completa y eliminación de F009, mientras que tres unidades permiten construir un núcleo de almacenamiento automatizado más estable.

Tres lifts permiten:

1. Consolidar CX dentro de Werk 12.
2. Absorber los materiales FSA/FSK actualmente dependientes de F009.
3. Reducir relocalizaciones internas 315.
4. Distribuir materiales de alta rotación entre más de una unidad.
5. Evitar un single point of failure crítico.
6. Mantener capacidad usable suficiente bajo crecimiento Nordstern 2026.
7. Crear una base compatible con SAP EWM.

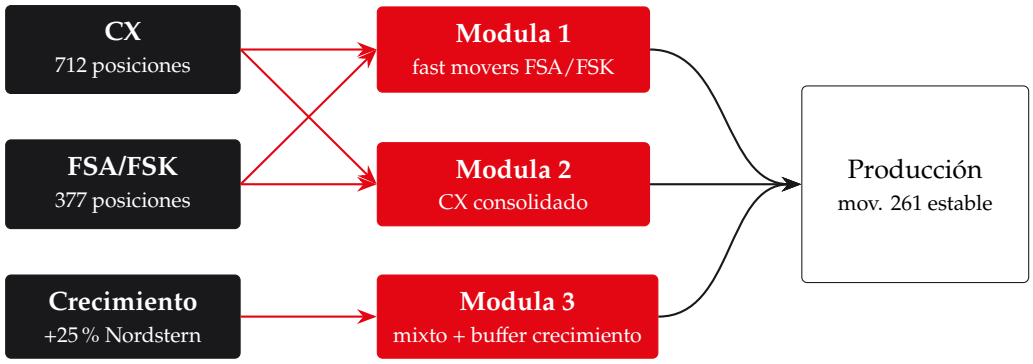


Figure 10.11: Esquema operacional de la configuración óptima: los tres lifts distribuyen CX, FSA/FSK y fast movers, dejando buffer para el crecimiento.

Esta interpretación es esencial porque la optimización no debe evaluarse como un ejercicio abstracto. El resultado matemático debe tener sentido en la planta. En este caso, el óptimo $(x^\star = 3)$ coincide con la lectura operacional: tres módulos entregan suficiente capacidad usable, mejor distribución de picking, redundancia y alineación estratégica.

10.13 Interpretación económica

Desde la perspectiva económica, tres lifts representan el punto de máximo valor presente. El escenario de un lift tiene la TIR y ROI más altos, pero esto ocurre porque la inversión inicial es pequeña y el primer módulo captura los ahorros más evidentes. Sin embargo, ese escenario no resuelve completamente la necesidad de capacidad y robustez. El escenario de dos lifts mejora el VAN, pero sigue quedando bajo el requerimiento operacional de diseño. El escenario de tres lifts maximiza el VAN y cumple las restricciones.

Los escenarios de cuatro y cinco lifts generan mayores ahorros anuales absolutos, pero menor valor económico neto. Esto ocurre porque los ahorros marginales son cada vez menores, mientras que cada lift adicional mantiene el mismo costo de inversión. En otras palabras, los costos crecen de forma lineal, pero los beneficios crecen de forma cóncava.

La decisión económica puede resumirse así:

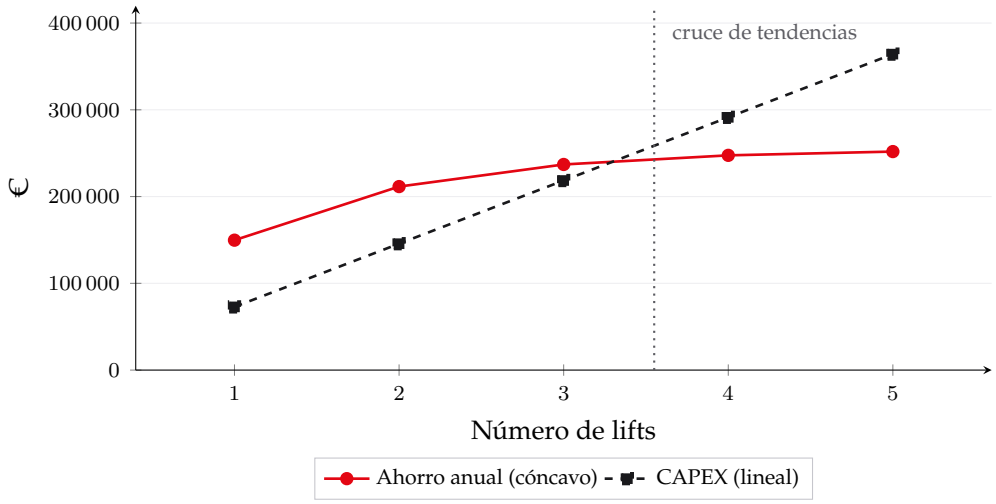


Figure 10.12: Curva de ahorros cóncava frente a CAPEX lineal: a partir del cuarto lift la inversión acumulada crece más rápido que el beneficio.

> *El tercer lift es el último módulo cuyo ahorro marginal supera el umbral mínimo requerido para justificar la inversión. El cuarto lift, aunque entrega capacidad adicional, no alcanza a generar ahorro marginal suficiente bajo el horizonte de cinco años y la tasa de descuento del 8*

Esta frase resume el resultado financiero del modelo de una manera clara y defendible.

10.14 Interpretación estratégica

Desde la perspectiva estratégica, la configuración de tres lifts se alinea con Nordstern 2026 porque permite avanzar hacia una operación más compacta, digital, escalable y menos dependiente de almacenes auxiliares. La decisión no busca simplemente maximizar un indicador financiero aislado, sino construir una plataforma intralogística capaz de sostener el crecimiento futuro de CX y FSA/FSK.

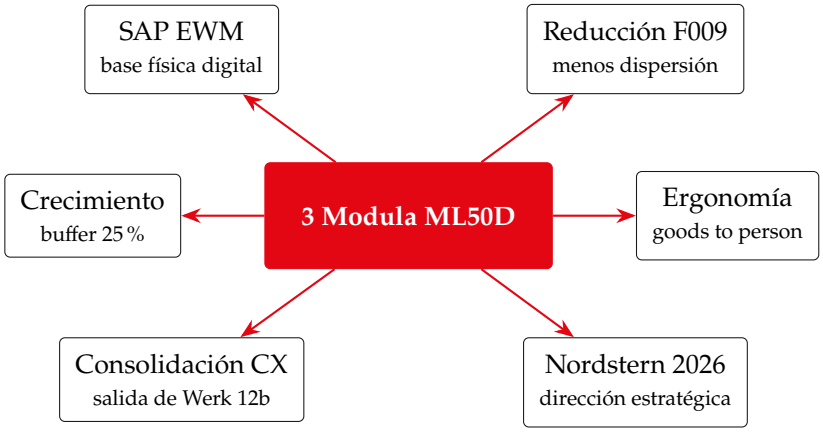


Figure 10.13: Alineación estratégica de la configuración óptima con los pilares de la transformación de Werk 12.

Nordstern 2026 exige una solución capaz de apoyar consolidación, integración SAP EWM y aumento de densidad de almacenamiento. Bajo esta visión, tres lifts son su-

periores a uno o dos porque entregan mayor capacidad operacional y reducen mejor la dependencia de F009. También son superiores a cuatro o cinco porque evitan sobredimensionar la inversión bajo el horizonte analizado.

La decisión de tres lifts puede entenderse como el punto donde convergen tres criterios:

1. Criterio financiero: máximo VAN.
2. Criterio operacional: capacidad usable suficiente y distribución de carga.
3. Criterio estratégico: alineación con Nordstern 2026 y reducción de F009.

10.15 Modelo extendido propuesto para asignación futura de materiales

Aunque el modelo principal determina el número óptimo de lifts, una evolución natural del análisis consiste en modelar la asignación de materiales específicos a cada módulo. Esta extensión sería útil en una etapa posterior de implementación, cuando HYDAC disponga del listado detallado de SKUs, frecuencias de picking, pesos, volúmenes y restricciones de compatibilidad.

Se puede definir un conjunto de materiales ($j \in J$) y un conjunto de lifts ($i \in I$). La variable binaria de asignación sería:

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si el material } j \text{ se asigna al lift } i \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases} \tag{10.28}$$

Una restricción básica de asignación sería:

$$\sum_{i \in I} z_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \tag{10.29}$$

lo que asegura que cada material sea asignado exactamente a un lift.

La capacidad de cada lift se podría controlar mediante:

$$\sum_{j \in J} v_j z_{ij} \leq K_i \quad \forall i \in I \tag{10.30}$$

donde (v_j) representa el volumen o número de posiciones requerido por el material (j), y (K_i) la capacidad disponible del lift (i).

Para balancear fast movers, se podría incorporar una restricción de carga de picking:

$$\sum_{j \in J} p_j z_{ij} \leq P_{max} \quad \forall i \in I \tag{10.31}$$

donde (p_j) representa la frecuencia de picking del material (j), y (P_{max}) el máximo nivel de carga permitido por lift.

Esta extensión permitiría optimizar no solo cuántos módulos instalar, sino también qué materiales colocar en cada uno. Su objetivo sería minimizar congestión, balancear carga, separar familias de materiales y asegurar que los fast movers no queden concentrados en una sola unidad. Aunque esta formulación no es necesaria para decidir la inversión inicial, representa una línea futura de mejora para la etapa de implementación.

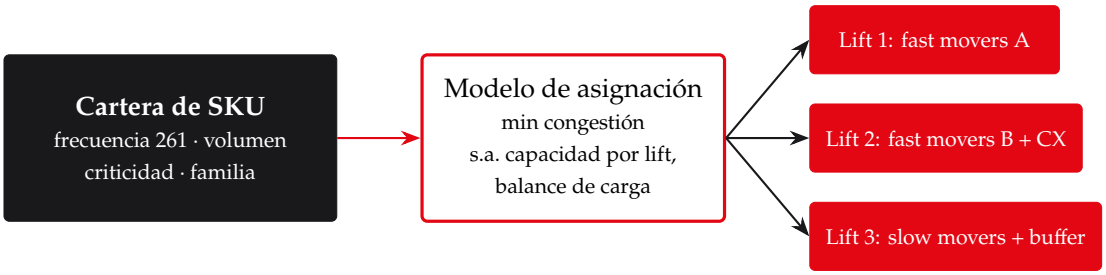


Figure 10.14: Extensión futura del modelo: asignación óptima de SKU a cada lift según frecuencia, volumen y criticidad.

10.16 Sensibilidad del modelo

El resultado del modelo depende de supuestos como ahorro anual, inversión por lift, tasa de descuento y requerimiento operacional de capacidad. Por ello, es importante interpretar la solución con una mirada de sensibilidad.

10.16.a Sensibilidad al ahorro marginal

El criterio marginal muestra que el umbral mínimo de ahorro anual para justificar un lift adicional es aproximadamente 18,244 €/año. El tercer lift supera este umbral con un ahorro marginal aproximado de 25,480 €/año. El cuarto queda por debajo con aproximadamente 10,510 €/año. Por lo tanto, para que el cuarto lift se justificara financieramente, su ahorro marginal tendría que aumentar de forma significativa.

10.16.b Sensibilidad al requerimiento operacional

Si el requerimiento operacional (D_{op}) fuera menor, dos lifts podrían parecer suficientes desde una mirada de capacidad. Sin embargo, bajo los objetivos de Nordstern 2026, la necesidad de eliminar F009, distribuir fast movers y entregar redundancia justifica un requerimiento de diseño más robusto. Si HYDAC decidiera relajar estos criterios estratégicos, el modelo podría favorecer configuraciones más pequeñas, pero con menor robustez operacional.

10.16.c Sensibilidad al CAPEX

Si el costo por lift aumentara, el umbral mínimo de ahorro marginal también aumentaría, lo que haría más difícil justificar unidades adicionales. Si el costo por lift disminuyera, podría mejorar la conveniencia de configuraciones mayores. Sin embargo, bajo los valores actuales, tres lifts siguen siendo la alternativa dominante.

10.16.d Sensibilidad a la tasa de descuento

Una tasa de descuento mayor reduce el valor presente de los ahorros futuros, mientras que una tasa menor lo aumenta. Como el proyecto presenta paybacks bajos, el resultado es relativamente robusto frente a cambios moderados en la tasa de descuento. Sin embargo, el máximo de VAN puede volverse más exigente si la tasa aumenta significativamente.

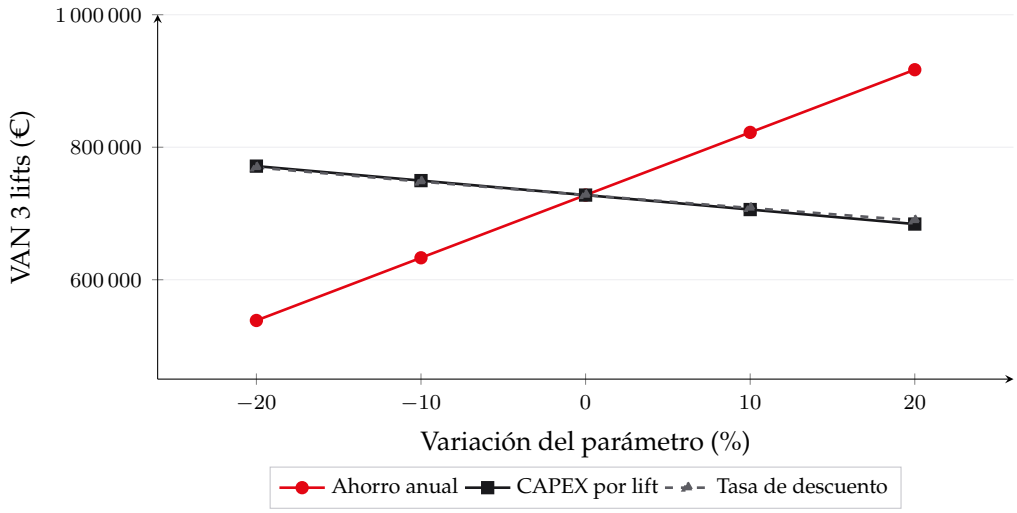


Figure 10.15: Sensibilidad del VAN del escenario óptimo: el ahorro anual es el parámetro dominante, mientras CAPEX y tasa de descuento tienen impacto moderado.

10.17 Discusión del resultado óptimo

El resultado del modelo no debe interpretarse como una recomendación mecánica, sino como una formalización de la lógica industrial observada durante el proyecto. El modelo confirma cuantitativamente lo que el diagnóstico, el análisis SAP, el benchmark, el modelamiento de capacidad y la evaluación financiera venían sugiriendo: tres módulos Modula ML50D entregan el mejor equilibrio para Werk 12.

La configuración de tres módulos no es la mínima posible, porque uno o dos módulos podrían parecer atractivos bajo ciertos indicadores financieros o volumétricos. Tampoco es la máxima posible, porque cuatro o cinco módulos entregarían mayor capacidad pero menor valor marginal. Tres módulos representan una solución intermedia, pero no por compromiso débil, sino porque se ubican en el punto donde la inversión todavía crea valor, la capacidad es suficiente y la estrategia Nordstern 2026 queda respaldada.

En términos de decisión gerencial, el modelo permite separar tres ideas que a veces se confunden:

1. La alternativa con mayor TIR no necesariamente es la mejor solución.
2. La alternativa con mayor capacidad no necesariamente crea más valor.
3. La alternativa óptima es aquella que maximiza valor cumpliendo restricciones reales.

Esta distinción es una de las contribuciones más importantes de la memoria. El proyecto demuestra que una decisión de automatización no debe tomarse por intuición tecnológica ni por un único indicador financiero. Debe tomarse integrando datos, capacidad, economía, operación y estrategia.

10.18 Configuración recomendada

La configuración recomendada es instalar tres módulos Modula ML50D en Werk 12. Esta recomendación se basa en los siguientes argumentos:

1. Es el primer escenario que cumple la capacidad operacional robusta definida por el modelo.
2. Entrega 4,032 KLT usables considerando tolerancia de 20
3. Maximiza el VAN entre los escenarios evaluados.
4. Mantiene una TIR superior al 100
5. Presenta un payback menor a un año.
6. Permite consolidar CX y FSA/FSK dentro de Werk 12.
7. Reduce o elimina la dependencia de F009.
8. Permite distribuir fast movers y disminuir riesgo de congestión.
9. Se alinea con SAP EWM y Nordstern 2026.
10. Evita el sobredimensionamiento económico de cuatro o cinco unidades.



Figure 10.16: Dashboard de la configuración recomendada: tres Modula ML50D con capacidad robusta, VAN máximo y payback inferior a un año.

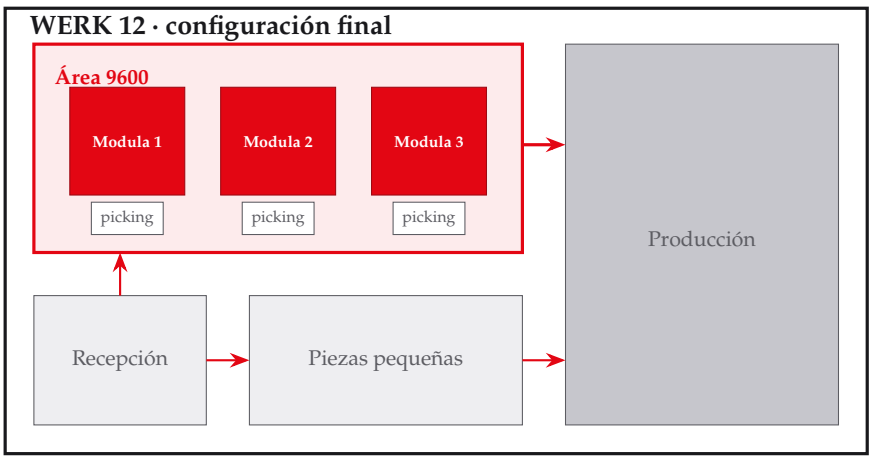
La recomendación puede expresarse formalmente como:

$$x^{\star} = 3 \text{ Modula ML50D} \tag{10.32}$$

Esta solución representa el punto de equilibrio entre automatización suficiente y disciplina de inversión. Permite modernizar el sistema sin sobredimensionarlo, captura los beneficios principales del proyecto y crea una base escalable para la evolución futura de Werk 12.

10.19 Síntesis del capítulo

Este capítulo desarrolló el modelo de optimización utilizado para determinar el número óptimo de módulos Modula ML50D en HYDAC Werk 12. Se formuló un modelo de programación entera mixta con variables binarias, función objetivo basada en VAN, restricciones de capacidad operacional, lógica secuencial y rendimientos decrecientes.



Werk 12b y F009 reducen su rol: CX y FSA/FSK quedan consolidados en el área 9600.

Figure 10.17: Layout conceptual final: tres Modula ML50D instalados en el área 9600 de Werk 12, con flujo directo hacia producción.

El modelo utiliza una inversión por lift de 72,837 €, un ahorro neto del primer lift de 149,738 €/año, un horizonte de cinco años, una tasa de descuento de 8%, capacidad usable de 1,344 KLT por unidad y un requerimiento operacional de diseño cercano a 4,000 KLT. A partir de estos parámetros, se evaluaron escenarios de uno a cinco módulos.

Los resultados muestran que tres módulos constituyen la configuración óptima. Uno y dos módulos son financieramente atractivos, pero no cumplen las restricciones operacionales robustas. Cuatro y cinco módulos son factibles en capacidad, pero presentan menor VAN debido a rendimientos decrecientes y mayor CAPEX. El análisis marginal confirma esta conclusión: el tercer módulo todavía supera el ahorro mínimo requerido para justificar la inversión, mientras que el cuarto ya no lo hace.

En consecuencia, el modelo recomienda instalar tres Modula ML50D como solución óptima para Werk 12. Esta configuración maximiza valor económico, cumple los requerimientos de capacidad, reduce dependencia de F009, mejora la operación de CX y FSA/FSK, y se alinea con Nordstern 2026. El capítulo siguiente discutirá el significado de estos resultados desde una perspectiva operacional, económica, estratégica y organizacional.

11 Discusión

11.1 Introducción

La discusión de resultados permite interpretar el significado de los hallazgos obtenidos a lo largo de la memoria, no solamente desde una perspectiva numérica, sino también desde una mirada operacional, económica, estratégica y organizacional. En los capítulos anteriores se diagnosticó el sistema actual de almacenamiento, se analizaron datos SAP, se modeló la capacidad requerida, se evaluaron alternativas tecnológicas, se calculó la conveniencia técnico económica y se formuló un modelo de optimización discreta. A partir de ese proceso, la configuración recomendada corresponde a la instalación de tres módulos Modula ML50D en HYDAC Werk 12.

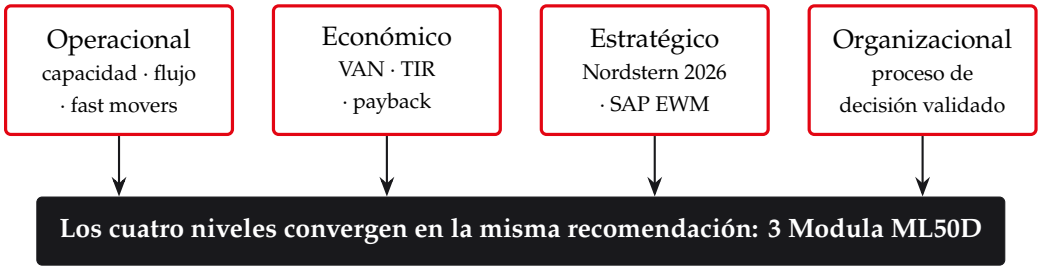


Figure 11.1: Estructura de la discusión: interpretación de los resultados en los niveles operacional, económico, estratégico y organizacional.

El principal resultado de la memoria no debe entenderse únicamente como la selección de una cantidad de equipos. La recomendación de tres módulos representa una decisión de diseño intralogístico, donde se busca transformar una estructura dispersa y parcialmente manual en un sistema más compacto, automatizado, trazable y preparado para el crecimiento futuro. Por esta razón, el valor del proyecto no está solamente en el cálculo financiero, sino en la metodología que permitió pasar desde un problema abierto hacia una recomendación justificable.

La discusión se organiza en cinco dimensiones. Primero, se interpretan los resultados obtenidos y su relación con la pregunta de investigación. Segundo, se analiza el impacto operacional esperado. Tercero, se discute el impacto económico y la lógica de inversión. Cuarto, se interpreta el valor estratégico del proyecto para Nordstern 2026. Finalmente, se presentan las principales limitaciones y oportunidades de trabajo futuro.

11.2 Interpretación general de los resultados

La pregunta de investigación planteada en esta memoria fue cómo diseñar una estrategia de automatización del almacenamiento que permitiera maximizar la capacidad y eficiencia operacional de las operaciones CX y FSA/FSK en HYDAC Werk 12 bajo las restricciones definidas por Nordstern 2026. A partir de los resultados obtenidos, se puede afirmar que la estrategia propuesta cumple con este propósito, ya que integra diagnóstico operacional, análisis SAP, modelamiento de capacidad, evaluación técnico económica y optimización discreta para fundamentar una decisión de inversión.

El resultado principal es que tres módulos Modula ML50D representan la configuración más equilibrada. Esta conclusión no surge de un único indicador, sino de la convergencia de distintos análisis. Desde la capacidad, tres módulos entregan 5,040 posiciones KLT nominales y 4,032 posiciones KLT usables considerando una tolerancia operacional de 20%. Desde la economía, tres módulos maximizan el VAN dentro de los escenarios evaluados. Desde la operación, permiten distribuir materiales de alta rotación, reducir dependencia de F009 y entregar mayor robustez. Desde la estrategia, se alinean con Nordstern 2026 y con la futura integración SAP EWM.

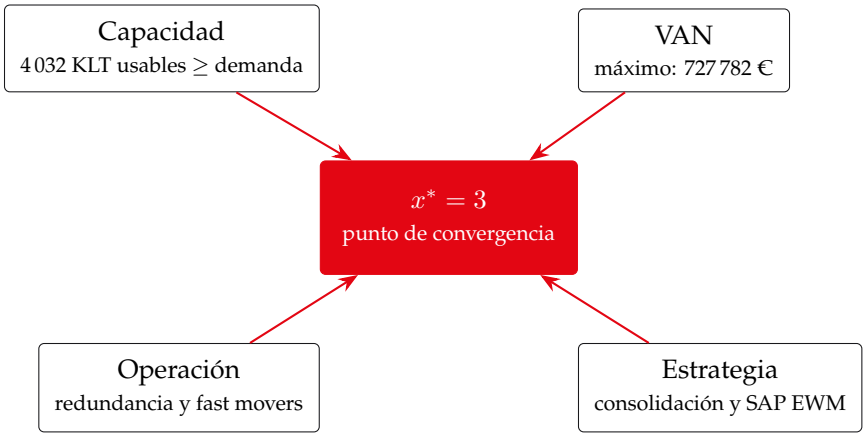


Figure 11.2: Convergencia de los análisis: capacidad, valor económico, operación y estrategia apuntan a la misma configuración.

Una lectura importante es que la configuración recomendada no corresponde a la mínima opción físicamente posible. El modelamiento de capacidad mostró que un módulo puede parecer suficiente si solo se observa la demanda nominal de posiciones. Sin embargo, cuando se considera capacidad usable, crecimiento, fast movers, redundancia y continuidad operacional, esa alternativa deja de ser robusta. Esta diferencia entre suficiencia física y suficiencia operacional es una de las ideas centrales de la memoria.

Tampoco corresponde a la alternativa de mayor capacidad. Cuatro o cinco módulos entregarían más holgura, pero con menor beneficio marginal y menor VAN. Esto demuestra que la decisión óptima no se encuentra en maximizar capacidad absoluta, sino en encontrar el punto donde la inversión adicional todavía crea valor y cumple las restricciones reales del sistema. En este caso, ese punto corresponde al tercer módulo.

11.3 Interpretación del diagnóstico As Is

El diagnóstico del sistema actual mostró que HYDAC Werk 12 enfrentaba una estructura logística fragmentada. CX se encontraba distribuido entre Werk 12b y el área 9600, mientras que FSA/FSK dependía parcialmente de F009. Esta configuración permitía sostener la operación existente, pero generaba recorridos adicionales, relocalizaciones internas, menor consolidación y mayor complejidad de gestión.

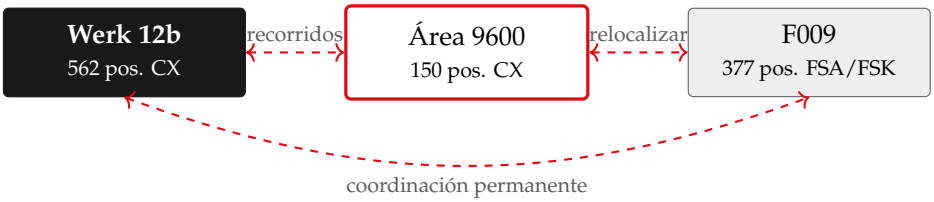


Figure 11.3: Lectura As Is del sistema: tres zonas fragmentadas unidas por recorridos, relocalizaciones y coordinación que no agregan valor.

El diagnóstico permitió entender que la restricción principal no era únicamente la falta de posiciones. El problema real era la combinación entre capacidad limitada, alta actividad operacional y dispersión física. En particular, FSA/FSK mostró un volumen muy alto de movimientos 261 hacia producción, lo que significa que su importancia no depende solamente del espacio ocupado, sino también de la frecuencia con que sus materiales deben ser abastecidos. Esta situación reforzó la necesidad de evaluar el sistema desde una mirada de flujo, no solo de inventario.

Además, la presencia de movimientos 315 evidenció relocalizaciones internas que consumen recursos sin agregar valor directo al producto. En este sentido, F009 actuaba como una solución de apoyo, pero también como una fuente de complejidad. El uso de un almacén auxiliar puede ser razonable en etapas de crecimiento, pero si se transforma en dependencia estructural, aumenta los costos ocultos de la operación.

La discusión del diagnóstico permite concluir que automatizar no era una respuesta aislada, sino una consecuencia lógica de los problemas observados. La dispersión de materiales, el crecimiento proyectado y la necesidad de integración SAP EWM exigían una solución que aumentara densidad, mejorara trazabilidad y permitiera consolidar materiales dentro de Werk 12.

11.4 Impacto operacional

El impacto operacional esperado de la configuración recomendada se relaciona principalmente con consolidación, reducción de movimientos internos, mejora del picking, ergonomía y estabilidad del sistema. La instalación de tres módulos Modula ML50D permitiría concentrar materiales CX y FSA/FSK en un sistema compacto dentro de Werk 12, reduciendo la dependencia de Werk 12b y F009.

11.4.a Consolidación de materiales

La consolidación de materiales es uno de los beneficios más relevantes. En la situación actual, CX y FSA/FSK se distribuyen entre distintas áreas, lo que genera mayor complejidad. Con tres módulos, la operación puede avanzar hacia una estructura centralizada,

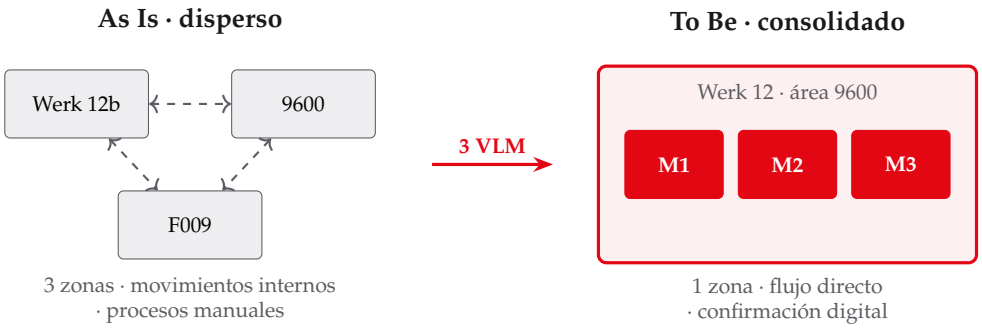


Figure 11.4: Comparación As Is versus To Be: de un sistema disperso en tres zonas a una operación consolidada con tres módulos verticales.

donde los materiales críticos estén más cerca del flujo principal de consumo y bajo una lógica de almacenamiento más controlada.

Esta consolidación no solo mejora el uso de espacio, sino que también simplifica la gestión del inventario. Un sistema más compacto permite reducir la necesidad de búsquedas, disminuir la dependencia de conocimiento informal de operadores y facilitar la estandarización de procesos. Además, permite construir una estructura más compatible con SAP EWM, ya que las ubicaciones pueden definirse de forma más clara y estable.

11.4.b Reducción de relocalizaciones internas

El análisis SAP mostró que los movimientos 315 representan una fuente relevante de actividad interna. Si los materiales se concentran dentro de una solución automatizada, la necesidad de relocalizarlos entre zonas puede disminuir. Esto genera un impacto operacional directo, ya que reduce movimientos que consumen tiempo pero no agregan valor directo al cliente o al producto final.

Desde una mirada Lean, las relocalizaciones internas pueden interpretarse como una forma de desperdicio, porque representan transporte o manipulación adicional. La automatización mediante VLM permite atacar este problema desde la estructura del sistema, no solamente desde la mejora puntual de un proceso. En vez de mover materiales repetidamente entre zonas, la solución busca ubicarlos desde el inicio en un sistema más estable y accesible.

11.4.c Mejora del picking hacia producción

El movimiento 261 fue identificado como el principal driver operacional, especialmente para FSA/FSK. Por lo tanto, cualquier solución futura debía mejorar la capacidad de respuesta hacia producción. Los módulos verticales permiten reducir tiempos de búsqueda y desplazamiento mediante una lógica de material hacia el operador, lo que puede mejorar el flujo de picking y reducir tiempos no productivos.

La configuración de tres módulos es especialmente relevante porque permite distribuir materiales de alta rotación entre distintas unidades. Esto reduce el riesgo de concentrar todo el picking en una sola estación y mejora la capacidad de absorber picos de demanda. En una operación con alto volumen de movimientos hacia producción, esta distribución es tan importante como la capacidad total.

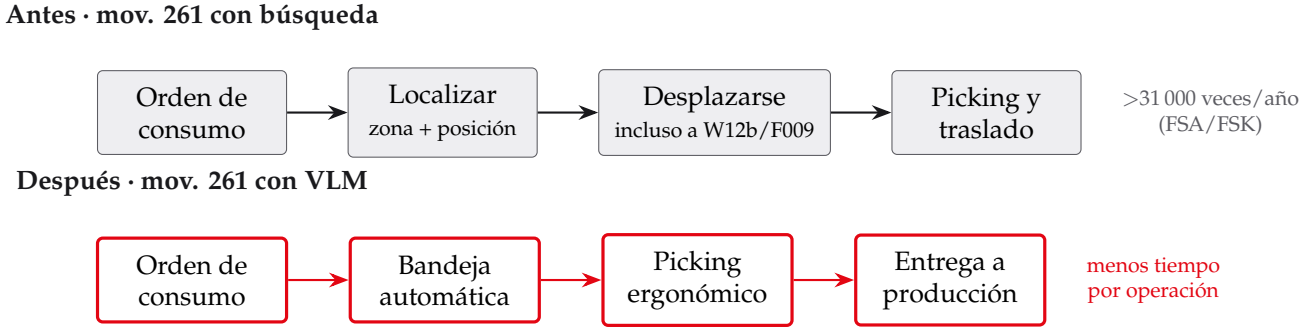


Figure 11.5: Impacto de la automatización sobre el flujo de consumo 261: cada picking elimina búsqueda y desplazamiento, multiplicado por decenas de miles de operaciones anuales.

11.4.d Ergonomía y condiciones de trabajo

Otro impacto esperado es la mejora ergonómica. En sistemas manuales, los operadores pueden tener que caminar largas distancias, agacharse, alcanzar materiales en niveles incómodos o manipular cajas de forma repetitiva. Los VLM presentan el material a una altura de trabajo más adecuada, reduciendo esfuerzo físico y mejorando la seguridad de la operación.

Aunque la ergonomía puede ser difícil de monetizar completamente, representa un beneficio relevante para la organización. Una operación más ergonómica puede reducir fatiga, errores, riesgos de accidente y variabilidad del desempeño. Por lo tanto, este beneficio debe considerarse como parte del valor integral de la solución, aunque no siempre aparezca completamente reflejado en los indicadores financieros.

11.5 Impacto económico

La evaluación técnico económica mostró que la implementación de Modula ML50D es financieramente atractiva en todos los escenarios analizados. Sin embargo, el escenario de tres módulos destaca porque maximiza el Valor Actual Neto y mantiene una rentabilidad muy alta. Este resultado permite sostener que la recomendación no solo es operacionalmente conveniente, sino también económicamente sólida.

El escenario de un módulo presenta indicadores porcentuales muy altos, especialmente TIR y ROI, pero esto no significa que sea la mejor alternativa. Su alto retorno se explica porque el primer módulo captura los ahorros más evidentes con baja inversión inicial. No obstante, desde una perspectiva operacional, un módulo no entrega suficiente robustez para consolidar CX y FSA/FSK bajo Nordstern 2026.

El escenario de dos módulos mejora la situación y presenta un VAN elevado, pero todavía queda por debajo de la capacidad operacional robusta definida para el proyecto. En cambio, tres módulos logran el mayor VAN, con un payback menor a un año y una TIR superior al 100%. Esto muestra que la configuración recomendada no sacrifica rentabilidad por estrategia, sino que combina ambas dimensiones.

Los escenarios de cuatro y cinco módulos permiten observar claramente los rendimientos decrecientes. Aunque aumentan los ahorros anuales absolutos, reducen el VAN debido al CAPEX adicional y al menor beneficio marginal. Esta es una conclusión importante para la empresa, porque muestra que la automatización también debe tener disciplina de

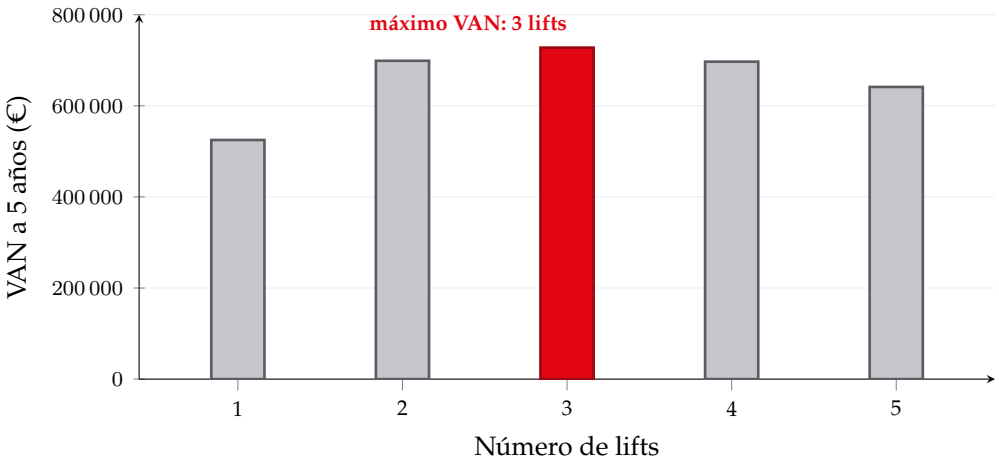


Figure 11.6: VAN por escenario en la discusión de resultados: el máximo se alcanza con tres módulos.

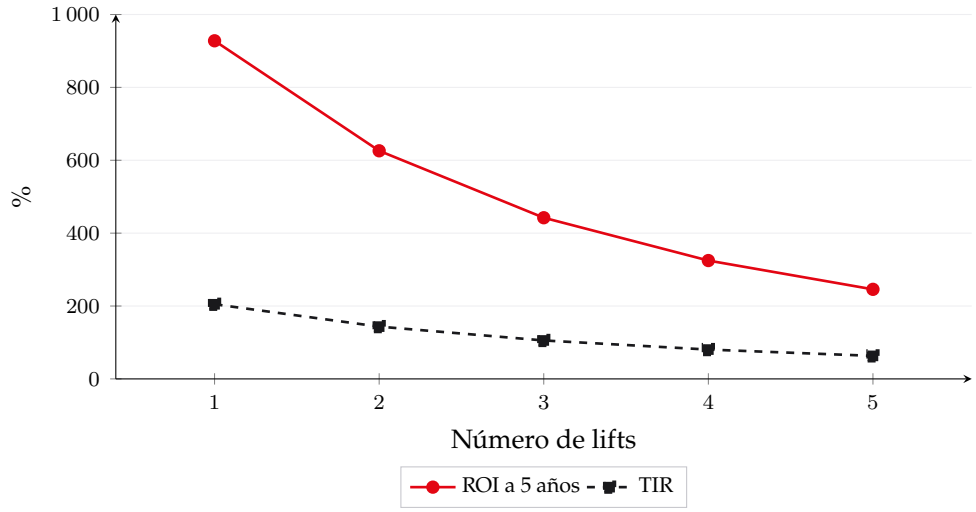


Figure 11.7: TIR y ROI por escenario: ambos indicadores decrecen con el número de unidades, pero permanecen en niveles excepcionales hasta tres lifts.

inversión. Comprar más tecnología no siempre genera más valor.

11.6 Rendimientos decrecientes y decisión marginal

Una de las contribuciones más relevantes del análisis es la incorporación de rendimientos decrecientes. En muchos proyectos industriales, las primeras acciones de mejora capturan los beneficios más importantes, mientras que las acciones adicionales generan beneficios cada vez menores. Esta lógica se observó claramente en el caso de los módulos Modula ML50D.

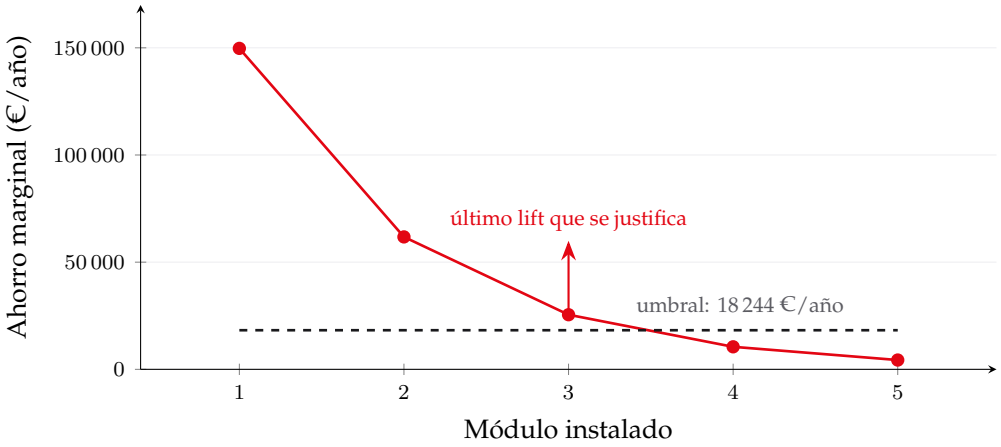


Figure 11.8: Criterio marginal en la discusión: el tercer lift es el último cuyo ahorro marginal supera el mínimo requerido para justificar su inversión.

El análisis marginal mostró que el tercer módulo todavía genera un ahorro marginal superior al umbral mínimo necesario para justificar su inversión. En cambio, el cuarto módulo no alcanza dicho umbral. Esta lectura permite explicar la decisión con mucha claridad: el tercer módulo es el último que todavía crea valor marginal suficiente bajo el horizonte de evaluación y tasa de descuento utilizadas.

Este resultado evita una interpretación simplista de la automatización. La pregunta no es si un cuarto módulo genera ahorro, porque sí lo hace. La pregunta correcta es si el ahorro adicional justifica el costo adicional. Bajo los supuestos del modelo, la respuesta es no. Por lo tanto, el cuarto y quinto módulo entran en una zona de sobredimensionamiento financiero.

Esta discusión es importante porque muestra que la optimización no se trata solo de encontrar un número, sino de entender el punto de quiebre entre creación de valor y exceso de inversión. En el caso estudiado, ese punto se encuentra después del tercer módulo.

11.7 Impacto estratégico

Desde el punto de vista estratégico, la configuración de tres módulos Modula ML50D se alinea con Nordstern 2026 porque contribuye a consolidar operaciones, aumentar densidad de almacenamiento, reducir procesos manuales y preparar la planta para SAP EWM. Esta alineación es central, ya que el proyecto no debe evaluarse solo como una

inversión en equipos, sino como una pieza dentro de una transformación logística más amplia.

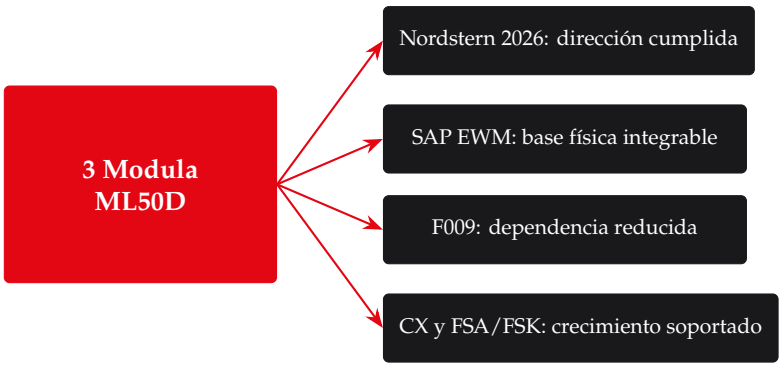


Figure 11.9: Lectura estratégica de la recomendación: la configuración de tres módulos habilita simultáneamente los objetivos de Nordstern 2026.

Nordstern 2026 plantea una dirección futura para Werk 12. Bajo esta visión, el sistema logístico debe ser más compacto, digital, escalable y menos dependiente de zonas auxiliares. Tres módulos permiten avanzar precisamente en esa dirección, ya que concentran materiales dentro de Werk 12 y crean una base física compatible con procesos más digitalizados.

La integración con SAP EWM es especialmente relevante. Una solución automatizada bien estructurada permite definir ubicaciones más claras, mejorar confirmaciones de movimientos y reducir dependencia de procesos manuales o registros paralelos. En este sentido, los módulos verticales no son solo almacenamiento físico, sino infraestructura para una gestión digital del almacén.

Además, la solución propuesta entrega escalabilidad. Tres módulos permiten absorber el crecimiento considerado en el horizonte Nordstern 2026, pero sin llegar a una sobrecapacidad excesiva. Esto es importante porque una estrategia de crecimiento debe equilibrar preparación futura con eficiencia en el uso del capital.

11.8 Impacto organizacional

El proyecto también generó un impacto organizacional importante porque permitió transformar información dispersa en una propuesta estructurada de decisión. Al inicio, la empresa contaba con una necesidad clara, pero no necesariamente con una solución cuantitativamente cerrada. Durante el proyecto se levantaron datos, se construyeron modelos, se compararon alternativas y se presentó una recomendación defendible.

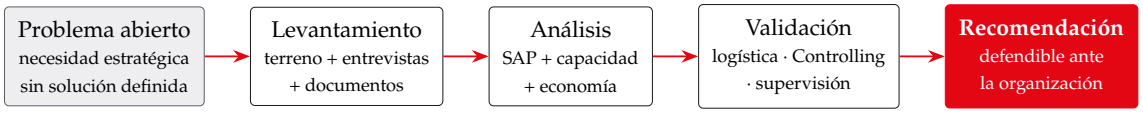


Figure 11.10: Proceso organizacional: transformación de una necesidad estratégica abierta en una recomendación cuantitativa validada.

Este proceso permitió generar una base común de conversación entre áreas. Logística, ingeniería, controlling, dirección y proveedores podían discutir sobre una misma estructura de datos y resultados. Esta es una contribución relevante, porque en decisiones

industriales complejas muchas veces el problema no es solamente técnico, sino también de alineamiento interno. Un modelo claro ayuda a que distintas áreas comprendan por qué una alternativa es preferible a otra.

El proyecto también muestra el valor de combinar observación en terreno con análisis cuantitativo. Las visitas a planta permitieron entender la realidad operativa, mientras que SAP y los modelos permitieron cuantificarla. Esta combinación hizo posible construir una recomendación que no fuera solamente teórica ni únicamente basada en experiencia, sino apoyada en ambas dimensiones.

En términos de aprendizaje organizacional, la metodología desarrollada puede servir como referencia para futuros proyectos de automatización. La lógica de diagnosticar, levantar datos, modelar capacidad, evaluar alternativas, calcular indicadores financieros y optimizar escenarios puede replicarse en otras áreas o decisiones de inversión intralogística.

11.9 Comparación con la literatura y fundamentos teóricos

Los resultados son consistentes con los fundamentos teóricos revisados en el marco teórico. La literatura sobre intralogística destaca la importancia de reducir movimientos internos, mejorar trazabilidad, aumentar densidad y diseñar sistemas alineados con los flujos reales de producción. En este caso, el diagnóstico mostró precisamente que la dispersión de materiales y las relocalizaciones internas eran fuentes relevantes de ineficiencia.

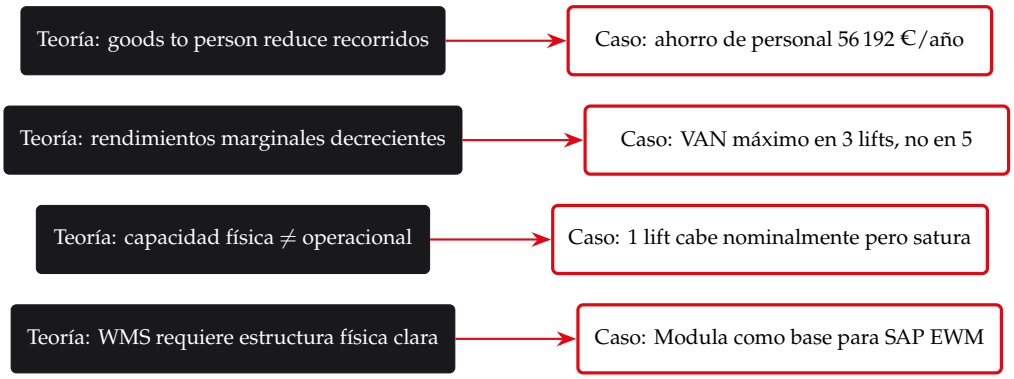


Figure 11.11: Correspondencia entre los fundamentos teóricos del Capítulo 3 y los hallazgos empíricos del caso HYDAC.

La teoría sobre automatización de almacenes también señala que las soluciones goods to person pueden reducir recorridos y mejorar ergonomía. Este principio se refleja en la propuesta de Modula ML50D, donde el material es acercado al operador en vez de exigir que el operador recorra el almacén. Este cambio es especialmente valioso cuando existen altos volúmenes de movimientos hacia producción.

La teoría de evaluación de proyectos indica que una inversión debe analizarse considerando flujos de caja, VAN, TIR, ROI y payback. Sin embargo, el caso demuestra que estos indicadores deben interpretarse junto con restricciones operacionales. La alternativa con mayor TIR no siempre es la mejor solución, porque puede no cumplir los objetivos estratégicos o de capacidad. Esta conclusión es muy relevante para Ingeniería Civil Industrial, porque muestra la necesidad de integrar criterios financieros con criterios de

operación.

Finalmente, la teoría de optimización discreta permite formalizar decisiones donde las variables no son continuas, como el número de equipos a instalar. En este caso, el modelo MIP permitió representar la decisión de manera clara y justificar por qué tres módulos son óptimos bajo restricciones reales. La incorporación de rendimientos decrecientes agrega realismo al modelo, ya que evita asumir que cada módulo adicional genera el mismo beneficio.

11.10 Limitaciones del análisis

Aunque la memoria entrega una recomendación robusta, es importante reconocer sus limitaciones. La primera limitación corresponde a la calidad y disponibilidad de datos. El análisis se basó en información SAP, observaciones de terreno, datos internos de HYDAC y documentación de proveedores. Si bien estos datos fueron validados durante el proyecto, todo modelo depende de la precisión de sus entradas. Cambios en la clasificación de materiales, en la forma de registrar movimientos o en la estructura futura de SAP EWM podrían modificar algunos resultados.

La segunda limitación corresponde al horizonte temporal. La evaluación financiera se realizó a cinco años. Este horizonte es razonable para comparar escenarios, pero no captura necesariamente toda la vida útil de los equipos. Si se extendiera el horizonte, algunos escenarios con mayor capacidad podrían mejorar su posición relativa, aunque bajo los supuestos actuales tres módulos siguen siendo la alternativa más equilibrada.

La tercera limitación se relaciona con los supuestos de ahorro. Los beneficios estimados incluyen ahorro de personal, inventario, superficie, relocalizaciones y posiciones. Algunos de estos ahorros son más directos y otros dependen de que la operación futura efectivamente capture las mejoras esperadas. Por ejemplo, la reducción de movimientos internos requiere que los procesos se rediseñen correctamente y que la integración con SAP EWM se implemente de forma adecuada.

La cuarta limitación corresponde a la etapa de implementación. Esta memoria evalúa, modela y recomienda una configuración, pero no desarrolla la ingeniería detallada de instalación, la programación de interfaces SAP EWM, la gestión del cambio con operadores, las pruebas de puesta en marcha ni la operación real post implementación. Esos elementos son fundamentales para capturar los beneficios estimados, pero quedan fuera del alcance principal de esta memoria.

La quinta limitación se relaciona con la incertidumbre futura. Nordstern 2026 considera crecimiento y transformación logística, pero el volumen real de materiales, la mezcla de productos y la demanda futura pueden variar. Si el crecimiento fuera mucho mayor al esperado, configuraciones más grandes podrían volverse atractivas. Si el crecimiento fuera menor, la holgura de tres módulos seguiría entregando robustez, pero podría reducir la utilización efectiva.

11.11 Riesgos de implementación

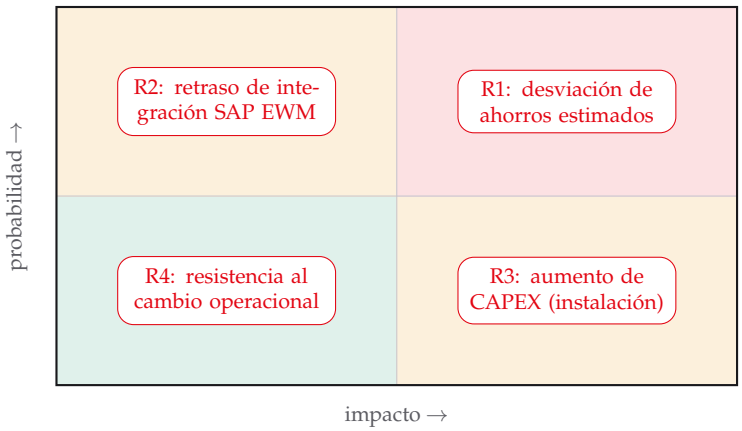
Aunque la recomendación de tres módulos es sólida desde el punto de vista analítico, la implementación práctica puede enfrentar riesgos. El primero es el riesgo de integración digital. Para que el sistema genere todo su valor, debe integrarse correctamente con SAP

EWM, incluyendo estructura de ubicaciones, confirmación de movimientos, procesos de picking, put away y trazabilidad.

El segundo riesgo es la gestión del cambio. Los operadores deberán adaptarse a una forma distinta de trabajar, pasando desde una lógica más manual hacia un sistema automatizado. Esto requiere capacitación, claridad de procesos y acompañamiento durante la transición. Una solución técnicamente buena puede perder valor si los usuarios no la adoptan correctamente.

El tercer riesgo es la parametrización inicial. La asignación de materiales a los módulos debe realizarse cuidadosamente. Si los fast movers quedan mal distribuidos, pueden aparecer cuellos de botella incluso con tres módulos. Por ello, la implementación debe incluir un análisis detallado de SKU, frecuencia de picking, volumen, peso y compatibilidad.

El cuarto riesgo es el mantenimiento y disponibilidad del sistema. Aunque tres módulos entregan mayor redundancia que uno o dos, sigue siendo necesario definir planes de mantenimiento preventivo y protocolos de contingencia. La automatización mejora la operación, pero también introduce dependencia tecnológica.



Mitigación: R1 seguimiento post-implementación de KPI · R2 plan de integración por fases
R3 negociación y contingencia de inversión · R4 capacitación y participación temprana de operadores

Figure 11.12: Matriz de riesgos de implementación con probabilidad, impacto y lineamientos de mitigación.

11.12 Trabajo futuro

El trabajo futuro puede organizarse en cinco líneas principales.

11.12.a Asignación optimizada de materiales a los módulos

Una extensión natural del modelo consiste en optimizar la asignación de SKUs a cada módulo. Esta asignación debería considerar frecuencia de picking, peso, volumen, familia de materiales, compatibilidad, criticidad y demanda futura. El objetivo sería balancear la carga entre módulos, evitar congestión y asegurar que los fast movers estén distribuidos adecuadamente.

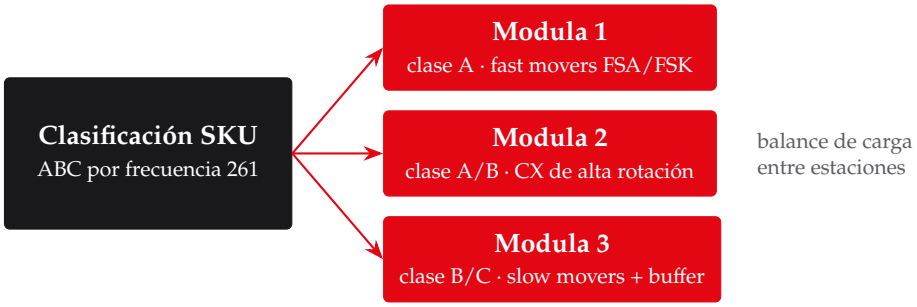


Figure 11.13: Línea futura: asignación de SKU a cada módulo según clasificación ABC, balanceando la carga de picking.

11.12.b Integración detallada con SAP EWM

Otra línea futura corresponde a desarrollar el diseño detallado de integración con SAP EWM. Esto incluye definición de estructuras de almacenamiento, ubicaciones, reglas de put away, estrategias de picking, confirmaciones, interfaces con Modula y tratamiento de excepciones. Esta etapa es crítica para transformar la recomendación estratégica en un sistema operativo real.

11.12.c Simulación operacional

Una tercera línea corresponde a realizar simulación de eventos discretos o digital twin del sistema futuro. Esto permitiría evaluar tiempos de espera, utilización de módulos, congestión, respuesta ante picos de demanda y desempeño bajo distintos escenarios de operación. La simulación permitiría validar de forma más fina la configuración antes de la puesta en marcha.

11.12.d Evaluación post implementación

Una vez implementado el sistema, sería recomendable realizar una evaluación post implementación. Esta evaluación debería comparar los indicadores reales con los estimados en la memoria, incluyendo movimientos 315, tiempos de picking, utilización de F009, ahorro de superficie, productividad de operadores, disponibilidad del sistema y cumplimiento de los beneficios financieros.

11.12.e Automatización del transporte interno mediante AMR

Finalmente, una línea futura importante corresponde a profundizar la automatización del transporte interno mediante AMR. Una vez que los materiales se concentren en los módulos verticales, será necesario optimizar el flujo entre los módulos y las estaciones de trabajo. La evaluación preliminar del OTTO 100 y de los esquemas de ruta punto a punto y circular puede servir como base para una segunda etapa de automatización intralogística.

11.13 Discusión integrada

La discusión integrada permite comprender que el valor de esta memoria no está solamente en recomendar tres módulos, sino en mostrar cómo se llega a esa recomendación. La empresa enfrentaba una necesidad estratégica, pero la solución no era evidente. A través del diagnóstico, los datos SAP, el modelamiento de capacidad, la evaluación económica y la optimización, fue posible construir una decisión razonada.

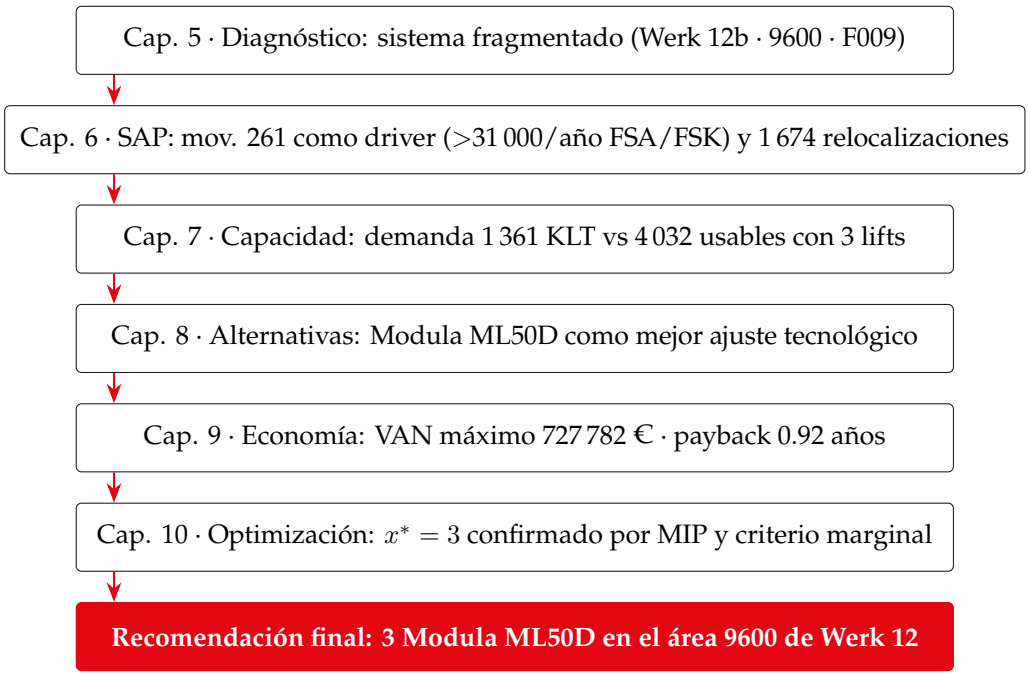


Figure 11.14: Vista integrada de la memoria: cada capítulo aporta la evidencia que sostiene la recomendación final.

El caso demuestra que una decisión de automatización debe ser tratada como un problema sistémico. Si se mira solo la tecnología, se puede elegir una máquina atractiva pero no necesariamente óptima. Si se mira solo el VAN, se puede elegir una configuración financieramente eficiente pero insuficiente. Si se mira solo la capacidad, se puede caer en sobredimensionamiento. La fortaleza del enfoque utilizado es que combina estas dimensiones.

Tres módulos Modula ML50D representan una solución equilibrada porque resuelven simultáneamente varias tensiones. Entregan más capacidad que la mínima física, pero no tanta como para sobredimensionar el sistema. Generan el mayor VAN, pero también cumplen restricciones operacionales. Apoyan Nordstern 2026, pero sin exceder innece-

sariamente el alcance de inversión. Mejoran la operación actual, pero también preparan la planta para una etapa futura de digitalización y automatización.

11.14 Síntesis del capítulo

La discusión de resultados confirma que la recomendación de instalar tres módulos Modula ML50D en HYDAC Werk 12 se sustenta en una integración coherente de análisis operacional, modelamiento de capacidad, evaluación económica y optimización discreta. El diagnóstico mostró una operación fragmentada y dependiente de zonas auxiliares. El análisis SAP confirmó altos volúmenes de movimientos hacia producción y relocalizaciones internas. El modelo de capacidad mostró que la suficiencia física no basta para asegurar robustez operacional. La evaluación económica identificó tres módulos como el escenario de mayor VAN. El modelo de optimización formalizó la decisión y mostró que el tercer módulo todavía crea valor marginal suficiente, mientras que el cuarto no.

Desde el punto de vista operacional, la solución permite consolidar CX y FSA/FSK, reducir dependencia de F009, mejorar picking, disminuir relocalizaciones y apoyar condiciones de trabajo más ergonómicas. Desde el punto de vista económico, presenta indicadores financieros altamente atractivos. Desde el punto de vista estratégico, se alinea con Nordstern 2026 y con la futura integración SAP EWM. Desde el punto de vista organizacional, entrega una metodología replicable para evaluar inversiones intralogísticas en entornos industriales.

En consecuencia, la discusión confirma que la automatización propuesta no debe entenderse como una compra de equipos, sino como una decisión estratégica de rediseño intralogístico. La configuración de tres Modula ML50D representa el punto de equilibrio entre capacidad, eficiencia, valor económico y preparación futura para HYDAC Werk 12.

12 Conclusiones

12.1 Conclusiones generales

La presente memoria tuvo como propósito desarrollar una estrategia de análisis, evaluación y optimización para apoyar la toma de decisiones intralogísticas en HYDAC Werk 12, en el contexto de la transformación definida por Nordstern 2026. A partir del diagnóstico realizado, fue posible observar que el problema inicial no correspondía únicamente a una falta de espacio físico, sino a una situación más compleja, donde coexistían restricciones de capacidad, dispersión de materiales, dependencia de almacenes auxiliares, altos volúmenes de movimientos hacia producción, relocalizaciones internas y necesidad de integración futura con SAP EWM.

El desarrollo del trabajo permitió demostrar que la automatización del almacenamiento debía abordarse como una decisión sistémica. No bastaba con seleccionar una tecnología atractiva, ni tampoco con elegir la alternativa de menor inversión o mayor capacidad nominal. La decisión requería comprender primero la operación actual, cuantificar sus movimientos mediante SAP, evaluar alternativas tecnológicas, modelar capacidad, estimar ahorros, comparar escenarios financieros y finalmente formular un modelo de optimización discreta capaz de justificar el número de módulos recomendado.

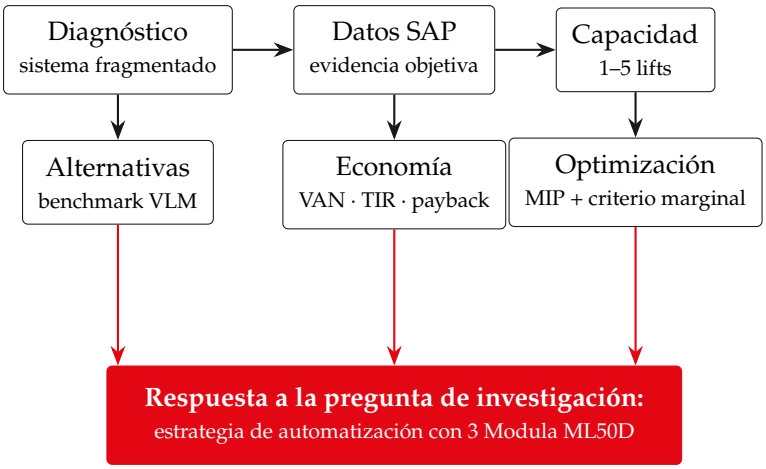


Figure 12.1: Síntesis del recorrido de la memoria: del diagnóstico y los datos SAP a la estrategia de automatización recomendada.

El principal resultado de la memoria es que la configuración recomendada para HYDAC Werk 12 corresponde a la instalación de tres módulos Modula ML50D. Esta re-

comendación se sustenta en la convergencia de tres dimensiones. Desde la perspectiva operacional, tres módulos permiten consolidar CX y FSA/FSK dentro de Werk 12, reducir la dependencia de F009, distribuir materiales de alta rotación y entregar mayor robustez al sistema. Desde la perspectiva económica, tres módulos maximizan el Valor Actual Neto entre los escenarios evaluados y mantienen indicadores financieros altamente atractivos. Desde la perspectiva estratégica, la configuración se alinea con Nordstern 2026, la futura integración SAP EWM y la necesidad de construir una logística más compacta, digital y escalable.

Una conclusión especialmente importante es que la alternativa óptima no corresponde necesariamente a la configuración con mayor TIR, mayor ROI o mayor capacidad absoluta. Un módulo presenta indicadores porcentuales muy altos, pero no resuelve completamente las restricciones operacionales. Cuatro o cinco módulos entregan más capacidad, pero generan menor valor marginal y reducen el VAN. Tres módulos representan el punto de equilibrio entre capacidad suficiente, rentabilidad, robustez operacional y disciplina de inversión.

12.2 Respuesta a la pregunta de investigación

La pregunta de investigación planteada fue:

> *¿Cómo diseñar una estrategia de automatización del almacenamiento que permita maximizar la capacidad y eficiencia operacional de las operaciones CX y FSA/FSK en HYDAC Werk 12 bajo las restricciones definidas por Nordstern 2026?*

La respuesta desarrollada en esta memoria es que dicha estrategia debe diseñarse mediante una metodología integrada de diagnóstico operacional, análisis de datos SAP, modelamiento de capacidad, evaluación de alternativas, evaluación técnico económica y optimización discreta. Esta metodología permite pasar desde una necesidad estratégica abierta hacia una recomendación de inversión concreta y defendible.

En el caso de HYDAC Werk 12, la estrategia recomendada consiste en implementar tres módulos Modula ML50D como núcleo de almacenamiento automatizado para consolidar las operaciones CX y FSA/FSK. Esta configuración permite aumentar la densidad de almacenamiento, reducir la dispersión entre Werk 12b, área 9600 y F009, disminuir relocalizaciones internas, mejorar el flujo hacia producción y preparar la operación para SAP EWM.

La memoria demuestra que la maximización de capacidad y eficiencia operacional no se logra simplemente instalando la mayor cantidad posible de equipos, sino seleccionando la configuración que mejor equilibra capacidad usable, flujo operativo, crecimiento futuro, valor económico y alineación estratégica. Bajo esta lógica, tres módulos representan la configuración óptima para el horizonte analizado.

12.3 Cumplimiento del objetivo general

El objetivo general definido fue:

> *Diagnosticar y modelar el sistema de almacenamiento actual mediante análisis operacional y análisis de datos SAP, integrando herramientas de optimización discreta y evaluación técnico económica para apoyar la toma de decisiones intralogísticas.*

Este objetivo se cumple, ya que la memoria desarrolla un diagnóstico completo del sistema actual, caracteriza las áreas Werk 12, Werk 12b, área 9600 y F009, analiza movimientos SAP 101, 261 y 315, modela la capacidad requerida para CX y FSA/FSK, evalúa alternativas de almacenamiento automatizado, construye una evaluación técnico económica de escenarios y formula un modelo de optimización discreta para determinar el número recomendado de módulos.

El trabajo permitió transformar un problema operacional real en una decisión estructurada de inversión. La recomendación final no se basa únicamente en intuición o preferencia tecnológica, sino en una cadena lógica de evidencia, donde cada etapa alimenta a la siguiente. En este sentido, el objetivo general se cumple tanto en su dimensión técnica como en su dimensión de apoyo a la toma de decisiones.

12.4 Cumplimiento de objetivos específicos

12.4.a Objetivo específico 1

> *Caracterizar el sistema de almacenamiento actual mediante el análisis de procesos, flujos de materiales y datos operacionales asociados a las operaciones CX y FSA/FSK.*

Este objetivo se cumple mediante el diagnóstico del sistema actual. Se caracterizó la situación As Is de Werk 12, Werk 12b, área 9600 y F009, identificando una estructura logística fragmentada, con materiales distribuidos entre distintas zonas y dependencia de almacenes auxiliares. Se estableció que CX contaba con 562 posiciones en Werk 12b y 150 posiciones en el área 9600, mientras que FSA/FSK utilizaba 377 posiciones dentro de F009. Esta caracterización permitió identificar la dispersión como uno de los principales problemas del sistema.

12.4.b Objetivo específico 2

> *Analizar los patrones de movimiento e inventario a partir de información extraída desde SAP para identificar requerimientos operacionales y restricciones del sistema.*

Este objetivo se cumple mediante el análisis de datos SAP. Se estudiaron los movimientos 101, 261 y 315, identificando que el movimiento 261 representa el principal driver operacional, especialmente para FSA/FSK, con un volumen promedio anual superior a 31,000 movimientos. También se observaron movimientos 315 asociados a relocalizaciones internas, los cuales evidencian dispersión y reorganización frecuente de materiales. Esta información permitió demostrar que la solución futura debía considerar no solo capacidad estática, sino también intensidad de picking y estabilidad operacional.

12.4.c Objetivo específico 3

Modelar la capacidad de almacenamiento requerida bajo distintos escenarios de crecimiento y consolidación operacional.

Este objetivo se cumple mediante el modelo de capacidad. Se calculó un footprint base de 1,089 posiciones para CX y FSA/FSK, se incorporó crecimiento proyectado de 15% a 25% bajo Nordstern 2026 y se comparó la demanda resultante con la capacidad de uno a cinco módulos Modula ML50D. Cada módulo entrega 1,680 posiciones KLT nominales y 1,344 posiciones usables considerando una tolerancia operacional de 20%. El análisis mostró que tres módulos entregan una capacidad usable de 4,032 KLT, suficiente para sostener una operación robusta.

12.4.d Objetivo específico 4

Evaluar alternativas de almacenamiento automatizado mediante criterios operacionales, técnicos y económicos.

Este objetivo se cumple mediante la evaluación de alternativas. Se compararon racks tradicionales, expansión física, VLM, shuttle systems, AS/RS y proveedores como Modula, Kardex, Hänel y SSI Schäfer. La evaluación mostró que los VLM representan una alternativa equilibrada para el caso de Werk 12, debido a su alta densidad, ergonomía, compatibilidad con SAP EWM y capacidad de implementación dentro de una planta existente. Dentro de las alternativas VLM, Modula ML50D fue seleccionado como la opción más adecuada para el análisis detallado.

12.4.e Objetivo específico 5

Determinar configuraciones de almacenamiento que maximicen el desempeño operacional y la viabilidad económica mediante herramientas de optimización discreta.

Este objetivo se cumple mediante el modelo de optimización. Se formuló un modelo con variables binarias, función objetivo basada en VAN, restricciones de capacidad operacional, lógica secuencial y rendimientos decrecientes. El modelo mostró que tres módulos Modula ML50D maximizan el valor económico entre las configuraciones factibles. Además, el análisis marginal demostró que el tercer módulo todavía genera un ahorro superior al mínimo requerido para justificar su inversión, mientras que el cuarto módulo ya no lo hace.

12.4.f Objetivo específico 6

Proponer lineamientos para la toma de decisiones intralogísticas orientadas a la modernización del sistema de almacenamiento.

Este objetivo se cumple mediante la recomendación final y las líneas futuras propuestas. La memoria entrega una configuración recomendada, criterios de implementación, riesgos a considerar y oportunidades de mejora posterior, como asignación optimizada de SKUs, integración detallada con SAP EWM, simulación operacional, evaluación post implementación y automatización complementaria mediante AMR. Estos lineamientos permiten extender el valor del trabajo más allá de la decisión inicial de inversión.

12.5 Principales hallazgos

Los principales hallazgos de la memoria son los siguientes:

1. El problema de HYDAC Werk 12 no era únicamente falta de espacio, sino una combinación de capacidad limitada, dispersión de materiales, movimientos internos y necesidad de digitalización.

2. CX y FSA/FSK presentan problemáticas distintas pero complementarias. CX requiere consolidación desde Werk 12b hacia Werk 12, mientras que FSA/FSK presenta alta actividad de consumo hacia producción y dependencia de F009.

3. Los datos SAP permiten demostrar que el movimiento 261 es el principal driver operacional, especialmente para FSA/FSK, mientras que los movimientos 315 evidencian relocalizaciones internas y oportunidades de mejora.

4. La capacidad nominal no es suficiente para decidir el número de módulos. Es necesario considerar capacidad usable, tolerancia operacional, fast movers, crecimiento, redundancia y estabilidad del sistema.

5. Modula ML50D representa una alternativa adecuada porque combina alta densidad de almacenamiento, ergonomía, compatibilidad con SAP EWM y ajuste físico al layout de Werk 12.

6. La evaluación técnico económica muestra que todos los escenarios son atractivos en términos financieros, pero tres módulos maximizan el VAN.

7. Los rendimientos decrecientes explican por qué cuatro o cinco módulos no son recomendables bajo el horizonte analizado, a pesar de entregar mayor capacidad absoluta.

8. La configuración de tres módulos entrega el mejor equilibrio entre eficiencia operacional, valor económico y alineación estratégica con Nordstern 2026.



Figure 12.2: Dashboard final de la memoria: hallazgos y resultados principales de la estrategia de automatización propuesta.

12.6 Recomendaciones

A partir del análisis desarrollado, se recomienda a HYDAC avanzar con la implementación de tres módulos Modula ML50D en Werk 12 como núcleo de almacenamiento automatizado para CX y FSA/FSK. Esta recomendación se fundamenta en que tres módulos permiten consolidar materiales, reducir dependencia de F009, sostener crecimiento futuro, distribuir fast movers y maximizar el valor económico bajo los supuestos evaluados.

También se recomienda que la implementación no se limite a la instalación física de los equipos. Para capturar plenamente los beneficios estimados, es necesario desarrollar un plan detallado de integración con SAP EWM, definir estructuras de ubicación, reglas de asignación, estrategias de picking, procedimientos de put away, confirmaciones digitales y tratamiento de excepciones. La automatización solo generará todo su valor si el sistema físico y el sistema digital operan de forma coordinada.

Se recomienda además realizar una asignación detallada de materiales a cada módulo antes de la puesta en marcha. Esta asignación debería considerar frecuencia de picking, volumen, peso, familia de material, criticidad, compatibilidad y demanda futura. En particular, los fast movers deben distribuirse de manera balanceada para evitar congestión en una sola unidad.

Otra recomendación es establecer indicadores de seguimiento post implementación. Entre ellos se pueden considerar reducción de movimientos 315, disminución de uso de F009, tiempo promedio de picking, disponibilidad de equipos, utilización por módulo, exactitud de inventario, productividad de operadores y cumplimiento de ahorros proyectados. Estos indicadores permitirán verificar si los beneficios esperados se materializan en la operación real.

Finalmente, se recomienda considerar la automatización del transporte interno mediante AMR como una segunda etapa de modernización. Una vez consolidados los materiales en VLM, el siguiente desafío será optimizar el flujo entre los módulos y las estaciones de trabajo. En este sentido, la evaluación preliminar del OTTO 100 y de esquemas de ruteo punto a punto y circular puede servir como base para futuros desarrollos.

12.7 Limitaciones

Aunque los resultados obtenidos son robustos, la memoria presenta algunas limitaciones. En primer lugar, el análisis depende de la calidad y disponibilidad de los datos SAP utilizados. Si los registros, filtros o estructuras de movimiento cambian, algunos resultados podrían requerir actualización. En segundo lugar, la evaluación financiera se construyó sobre un horizonte de cinco años, por lo que no captura necesariamente la totalidad de la vida útil de los equipos.

En tercer lugar, algunos ahorros estimados dependen de que la implementación futura logre capturar efectivamente las mejoras proyectadas. Por ejemplo, la reducción de relocalizaciones internas requiere que los materiales sean asignados correctamente y que los procesos se rediseñen de manera coherente. En cuarto lugar, la memoria no incluye la ingeniería detallada de instalación, programación de interfaces SAP EWM ni puesta en marcha física de los equipos.

Finalmente, los supuestos de crecimiento bajo Nordstern 2026 pueden variar en el futuro. Si el crecimiento real fuera significativamente mayor o menor al esperado, podría

ser necesario actualizar el modelo de capacidad y la evaluación económica. Por ello, la recomendación debe entenderse como válida bajo el horizonte, datos y restricciones disponibles durante el desarrollo del proyecto.

12.8 Líneas futuras de investigación

Como líneas futuras, se propone en primer lugar desarrollar un modelo detallado de asignación de SKUs a los módulos Modula. Este modelo podría utilizar programación entera mixta para balancear carga de picking, capacidad, peso, volumen y criticidad de materiales. De esta forma, no solo se optimizaría el número de módulos, sino también la distribución interna de materiales entre ellos.

En segundo lugar, se recomienda profundizar el diseño de integración con SAP EWM. Esto incluye definir la estructura de bins, estrategias de picking, reglas de reposición, confirmaciones de movimientos, interfaces con Modula y trazabilidad de excepciones. Esta etapa será clave para pasar desde una recomendación de inversión hacia una operación automatizada real.

En tercer lugar, se propone construir una simulación operacional o digital twin de Werk 12. Esta herramienta permitiría evaluar tiempos de espera, congestión, utilización de módulos, flujos hacia producción y escenarios de crecimiento. También permitiría comparar políticas de asignación de materiales antes de implementarlas físicamente.

En cuarto lugar, se recomienda realizar una evaluación post implementación. Esta evaluación debería comparar los indicadores proyectados con los resultados reales obtenidos después de la puesta en marcha. De esta forma, HYDAC podría validar el retorno de la inversión, ajustar procesos y aprender para futuros proyectos de automatización.

En quinto lugar, se propone profundizar la implementación de AMR para transporte interno. La combinación de VLM y AMR puede permitir una arquitectura intralogística más completa, donde el almacenamiento y el transporte interno trabajen de manera integrada. Esta línea futura podría evaluar rutas, número de robots, reglas de scheduling, integración con WMS o SAP EWM, seguridad y costos operacionales.

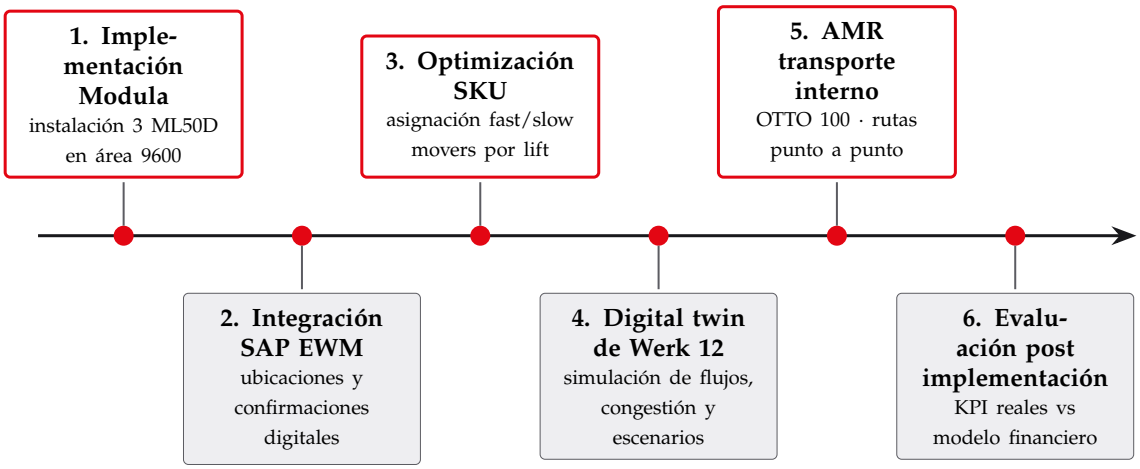


Figure 12.3: Roadmap futuro de la modernización intralogística de Werk 12: de la implementación de los módulos a la evaluación post-implementación.

12.9 Cierre final

La memoria desarrollada permite concluir que la automatización logística en HYDAC Werk 12 debe entenderse como una decisión estratégica de rediseño intralogístico. El proyecto comenzó con una necesidad abierta de capacidad, consolidación y modernización, y mediante un proceso estructurado fue posible construir una recomendación técnica, económica y operacionalmente fundamentada.

La configuración de tres módulos Modula ML50D representa el punto donde se equilibran capacidad, eficiencia, valor económico y preparación futura. Esta solución permite avanzar hacia una operación más compacta, reducir la dependencia de F009, apoyar el crecimiento de CX y FSA/FSK, mejorar la trazabilidad y preparar el sistema para SAP EWM bajo la visión Nordstern 2026.

Más allá de la solución específica, el principal aporte de esta memoria es la metodología desarrollada. El trabajo demuestra que una decisión de automatización industrial debe considerar el sistema completo: datos, personas, procesos, espacio, tecnología, costos y estrategia. En ese sentido, la memoria no solo documenta una práctica profesional, sino que presenta un caso real de aplicación de herramientas de Ingeniería Civil Industrial para apoyar una decisión de inversión intralogística en una empresa alemana de alta exigencia técnica.



Figure 12.4: HYDAC Werk 12: Equipo de Trabajo. Fuente: registro propio.

Bibliography

[1] Julio Juan Anaya Tejero. *Logística integral: la gestión operativa de la empresa*. 5th ed. Madrid: ESIC Editorial, 2015.

[2] Kaveh Azadeh, René de Koster, and Debjit Roy. "Robotized and automated warehouse systems: Review and recent developments". In: *Transportation Science* 53.4 (2019), pp. 917–945. DOI: 10.1287/trsc.2018.0873.

[3] Gabriel Baca Urbina. *Evaluación de proyectos*. 7th ed. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana, 2013.

[4] Peter Baker and Marco Canessa. "Warehouse design: A structured approach". In: *European Journal of Operational Research* 193.2 (2009), pp. 425–436. DOI: 10.1016/j.ejor.2007.11.045.

[5] Ronald H. Ballou. *Business Logistics/Supply Chain Management*. 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2004.

[6] John J. Bartholdi and Steven T. Hackman. *Warehouse and Distribution Science*. 0.98. https://www.warehouse-science.com. Atlanta, GA: Supply Chain and Logistics Institute, Georgia Institute of Technology, 2019.

[7] Leland Blank and Anthony Tarquin. *Engineering Economy*. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

[8] Nils Boysen, René de Koster, and Felix Weidinger. "Warehousing in the e-commerce era: A survey". In: *European Journal of Operational Research* 277.2 (2019), pp. 396–411. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.08.023.

[9] Richard A. Brealey, Stewart C. Myers, and Franklin Allen. *Principles of Corporate Finance*. 13th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2020.

[10] Sunil Chopra and Peter Meindl. *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. 6th ed. Boston: Pearson, 2016.

[11] George B. Dantzig. *Linear Programming and Extensions*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1963.

[12] FEM – Fédération Européenne de la Manutention. *FEM 9.851: Performance Data of Storage and Retrieval Machines – Cycle Times*. Tech. rep. Verificar edición vigente. FEM Product Group Intralogistics Systems, 2003.

[13] Giuseppe Fragapane et al. "Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda". In: *European Journal of Operational Research* 294.2 (2021), pp. 405–426. DOI: 10.1016/j.ejor.2021.01.019.

[14] Edward H. Frazelle. *World-Class Warehousing and Material Handling*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.

[15] Gianpaolo Ghiani, Gilbert Laporte, and Roberto Musmanno. *Introduction to Logistics Systems Management*. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2013.

[16] Jinxiang Gu, Marc Goetschalckx, and Leon F. McGinnis. "Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review". In: *European Journal of Operational Research* 203.3 (2010), pp. 539–549. DOI: 10.1016/j.ejor.2009.07.031.

[17] Jinxiang Gu, Marc Goetschalckx, and Leon F. McGinnis. "Research on warehouse operation: A comprehensive review". In: *European Journal of Operational Research* 177.1 (2007), pp. 1–21. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.02.025.

[18] Hänel GmbH & Co. KG. *Hänel Lean-Lift – Automated Storage and Retrieval Systems*. 2024. URL: https://www.haenel.de (visited on 11/15/2024).

[19] Frederick S. Hillier and Gerald J. Lieberman. *Introduction to Operations Research*. 10th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

[20] HYDAC International GmbH. *HYDAC International – Fluid Engineering and Industrial Solutions*. 2024. URL: https://www.hydac.com (visited on 11/15/2024).

[21] Henning Kagermann, Wolfgang Wahlster, and Johannes Helbig. *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group*. Tech. rep. Frankfurt am Main: acatech – National Academy of Science and Engineering, 2013.

[22] Kardex Remstar. *Kardex Shuttle – Vertical Lift Modules*. 2024. URL: https://www.kardex.com (visited on 11/15/2024).

[23] René de Koster, Tho Le-Duc, and Kees Jan Roodbergen. "Design and control of warehouse order picking: A literature review". In: *European Journal of Operational Research* 182.2 (2007), pp. 481–501. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.07.009.

[24] A. H. Land and A. G. Doig. "An automatic method of solving discrete programming problems". In: *Econometrica* 28.3 (1960), pp. 497–520. DOI: 10.2307/1910129.

[25] Heiner Lasi et al. "Industry 4.0". In: *Business & Information Systems Engineering* 6.4 (2014), pp. 239–242. DOI: 10.1007/s12599-014-0334-4.

[26] Jeffrey K. Liker. *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. New York: McGraw-Hill, 2004.

[27] Modula S.p.A. *Modula Vertical Lift Modules – Automatic Storage Systems*. 2024. URL: https://www.modula.com (visited on 11/15/2024).

[28] Luis Aníbal Mora García. *Gestión logística integral: las mejores prácticas en la cadena de abastecimiento*. 2nd ed. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2016.

[29] George L. Nemhauser and Laurence A. Wolsey. *Integer and Combinatorial Optimization*. New York: John Wiley & Sons, 1988.

[30] Kees Jan Roodbergen and Iris F. A. Vis. "A survey of literature on automated storage and retrieval systems". In: *European Journal of Operational Research* 194.2 (2009), pp. 343–362. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.01.038.

[31] Stephen A. Ross, Randolph W. Westerfield, and Bradford D. Jordan. *Fundamentals of Corporate Finance*. 12th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

[32] Mike Rother and John Shook. *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda*. Cambridge, MA: Lean Enterprise Institute, 2003.

[33] B. Rouwenhorst et al. "Warehouse design and control: Framework and literature review". In: *European Journal of Operational Research* 122.3 (2000), pp. 515–533. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00020-X.

[34] Alan Rushton, Phil Croucher, and Peter Baker. *The Handbook of Logistics and Distribution Management*. 6th ed. London: Kogan Page, 2017.

[35] SAP SE. *SAP Extended Warehouse Management (SAP EWM) – Product Documentation*. 2024. URL: https://help.sap.com/docs/SAP_EXTENDED_WAREHOUSE_MANAGEMENT (visited on 11/15/2024).

[36] Nassir Sapag Chain, Reinaldo Sapag Chain, and José Manuel Sapag Puelma. *Preparación y evaluación de proyectos*. 6th ed. Santiago de Chile: McGraw-Hill Interamericana, 2014.

[37] SSI Schäfer. *SSI LOGIMAT Vertical Lift Module*. 2024. URL: https://www.ssi-schaefer.com (visited on 11/15/2024).

[38] Francielly Hedler Staudt et al. "Warehouse performance measurement: a literature review". In: *International Journal of Production Research* 53.18 (2015), pp. 5524–5544. DOI: 10.1080/00207543.2015.1030466.

[39] William G. Sullivan, Elin M. Wicks, and C. Patrick Koelling. *Engineering Economy*. 16th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2014.

[40] James A. Tompkins et al. *Facilities Planning*. 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.

[41] VDI – Verein Deutscher Ingenieure. *VDI 3561: Test rules for storage and retrieval machines*. Tech. rep. Verificar edición vigente. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2020.

[42] H. Paul Williams. *Model Building in Mathematical Programming*. 5th ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2013.

[43] Wayne L. Winston. *Operations Research: Applications and Algorithms*. 4th ed. Belmont, CA: Brooks/Cole, 2004.

[44] Laurence A. Wolsey. *Integer Programming*. New York: John Wiley & Sons, 1998.

[45] James P. Womack and Daniel T. Jones. *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. 2nd ed. New York: Free Press, 2003.

Acknowledgments

A mis papás, primero que todo, porque si estoy llegando a este momento es por ustedes, por su amor, por su esfuerzo, por creer en mí incluso cuando yo mismo no sabía muy bien hacia dónde iba todo esto, a mi Mamita Mimí, al Tata, al Abuelo que me protege SIEMPRE, a la Lita, porque cada uno a su manera fue parte de este camino, con cariño, con consejos, con preocupación, con esa forma tan bonita de acompañar aunque a veces estuvieran lejos, al Benjita también, por apoyarme siempre, por estar ahí, por entenderme y por ser parte de esta historia que no habría sido igual sin él... esta memoria significa mucho para mí porque es mi última entrega de la universidad, de esta etapa hermosa que me vio crecer, equivocarme, aprender, llorar, reír, conocer amigos increíbles y vivir momentos que de verdad voy a llevar conmigo para siempre, gracias a la Universidad Técnica Federico Santa María por formarme no solo como futuro Ingeniero Civil Industrial, sino también como persona, con carácter, con hambre de aprender y con ganas de hacer cosas grandes, agradezco también a mi profesor guía, profesor Rolando Rubilar, a quien tuve el agrado de conocer en esta última etapa de mi carrera y que desde el primer momento me acompañó con buena disposición, apoyo y confianza durante el desarrollo de esta memoria, gracias por darse el tiempo de orientarme en este proceso tan importante y por ayudarme a llegar a la meta final de estos años de universidad, esta memoria fue desarrollada durante una práctica internacional en HYDAC INTERNATIONAL GmbH Werk 12 en Alemania, una experiencia que me marcó muchísimo y que me hizo sentir que todo el esfuerzo de estos años valió la pena, agradezco profundamente el apoyo financiero y académico entregado por el servicio alemán académico DAAD Stipendiat y también el apoyo financiero constante recibido por Mercedes Benz AG, porque gracias a esas oportunidades pude vivir esta experiencia internacional y mantenerme todo el tiempo que cambió mi forma de mirar la ingeniería, la industria y mi propio futuro, gracias también a las personas de HYDAC que confiaron en mí y en nuestro trabajo, que nos abrieron las puertas, que nos enseñaron y que nos hicieron sentir parte de algo real, grande y desafiante, cierro esta etapa con mucha emoción, con cansancio también, pero sobre todo con gratitud, porque miro hacia atrás y veo todo lo vivido y pienso que sí, que valió completamente la pena, gracias a todos quienes estuvieron en este camino, de corazón, gracias infinitas...