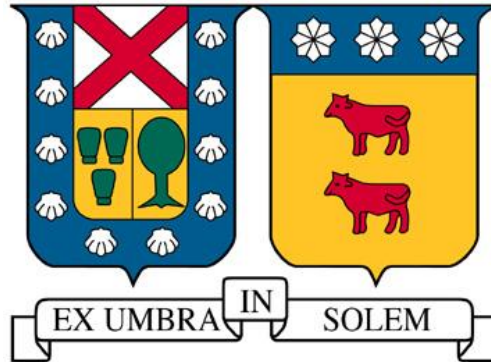


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
SANTIAGO – CHILE



“Análisis y mejora de un proceso de preparación de pedidos, mediante la implementación de un Sistema Put to Light en una bodega de consumo masivo 3PL”

DANIEL ALEJANDRO
MUÑOZ PAREDES

TRABAJO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: SR. RODRIGO MENA

SEPTIEMBRE 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: Análisis y mejora de un proceso de preparación de pedidos, mediante la implementación de un Sistema Put to Light en una bodega de consumo masivo 3PL

Nombre del candidato(a): Daniel Alejandro Muñoz Paredes

Carrera / Grado: Magíster en Ingeniería Industrial

Campus: Santiago Vitacura ; **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Rodrigo Mena, 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

☒ 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:

☐ 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: 28-09-2026

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 25/09/2026

; 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.

Resumen Ejecutivo

Esta tesina analiza y propone la mejora del proceso de preparación de pedidos en una operación logística 3PL mediante la implementación de un sistema Put to Light (PTL) en la etapa de clasificación y consolidación de pedidos de un canal de comercio electrónico. El proceso de preparación de pedidos constituye una de las actividades más críticas de un centro de distribución, especialmente en entornos de e-commerce caracterizados por pedidos de baja profundidad, alta variedad de referencias, exigencias crecientes de servicio y baja tolerancia al error.

La operación estudiada trabaja bajo una política de preparación por lotes apoyada por radiofrecuencia durante la recolección. Sin embargo, las tareas de conformación de los grupos de trabajo y, principalmente, las de clasificación posterior por pedido presentan un alto grado de procesamiento manual. La llegada fraccionada de referencias de una misma orden y una lógica documental que condiciona el avance de cada pedido al cierre del grupo completo generan trabajo en curso, dependencia del desempeño individual y dificultades para absorber períodos de alta demanda. La operación estima una tasa de error de despacho de 2 % a 3 % en condiciones ordinarias, que puede aumentar hasta aproximadamente 4 % durante campañas.

Frente a ello, el trabajo evalúa un sistema Put to Light como alternativa de automatización intermedia, manteniendo la lógica de batch picking y trasladando el apoyo tecnológico hacia la clasificación posterior a la recolección. El estudio corresponde a un caso aplicado de enfoque predominantemente cuantitativo y utiliza registros transaccionales de doce meses para caracterizar la demanda y establecer la línea base, complementados con información operacional y antecedentes técnicos. Por confidencialidad, los volúmenes presentados se encuentran transformados mediante un factor de escala constante que conserva las relaciones internas del negocio; la evaluación económica, en cambio, se realiza sobre la escala real de la operación.

A partir del diagnóstico se diseñó una arquitectura PTL modular de ocho estaciones: cinco disponibles para la configuración regular y tres adicionales para períodos de alta

demanda. La solución incorpora guiado luminoso, posiciones de clasificación y buffer, permite mantener cada pedido asignado hasta su completitud, admite la llegada fraccionada de referencias y desacopla la emisión documental del cierre del lote, de modo que cada orden pueda avanzar individualmente hacia empaque una vez completada.

Durante el desarrollo de la tesina la solución fue implementada, lo que permitió validar ex-post el procedimiento de dimensionamiento mediante 98.333 confirmaciones unitarias correspondientes a los primeros cuatro meses de operación. El contraste mostró estabilidad entre la estructura histórica y la observada posteriormente, además de una configuración implementada consistente con el diseño en número de estaciones y posiciones. También se identificaron desviaciones en algunos supuestos, particularmente en el tiempo de residencia de los pedidos, y una utilización operativa observada de 38,3 %, resultado consistente con la existencia de capacidad disponible y con una oportunidad de mejora en la alimentación y secuenciación de trabajo hacia las estaciones.

La evaluación económico-financiera muestra, bajo los supuestos considerados, resultados favorables en creación de valor y recuperación de la inversión. Un componente relevante corresponde a la reducción esperada de errores de clasificación y de los costos asociados a reprocesos y logística inversa. Dado que todavía no existe un registro sistemático post-implementación comparable con la situación inicial, este beneficio se basa en supuestos razonables respaldados por literatura, y es sometido a análisis de sensibilidad.

Finalmente, la comparación multicriterio con clasificación manual, clasificación durante la recolección, asistencia por radiofrecuencia y clasificación automática posiciona al Put to Light como la alternativa más adecuada para las condiciones del caso, principalmente por su equilibrio entre exactitud, escalabilidad, tolerancia a la llegada fraccionada de referencias e inversión. En síntesis, el estudio concluye que la clasificación asistida por un sistema Put to Light constituye una alternativa técnica y operacionalmente adecuada para la operación analizada, cuya conveniencia económica depende especialmente del costo de la no calidad, del volumen que debe absorber el sistema y del uso modular de la capacidad instalada.

Índice de Contenidos

RESUMEN EJECUTIVO	2
ÍNDICE DE CONTENIDOS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	10
1 INTRODUCCIÓN	12
1.1 CONTEXTO Y ANTECEDENTES	12
1.2 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	13
1.2.1 <i>Clasificación posterior a la recolección sin asistencia.....</i>	<i>13</i>
1.2.2 <i>Emisión documental condicionada al cierre del grupo.....</i>	<i>13</i>
1.2.3 <i>Conformación manual de los grupos de preparación.....</i>	<i>14</i>
1.2.4 <i>Manifestación agregada del problema</i>	<i>15</i>
1.3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	17
1.4 JUSTIFICACIÓN Y RELEVANCIA	17
1.5 OBJETIVO GENERAL	18
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.7 METODOLOGÍA	20
1.7.1 <i>Tipo y Enfoque del Estudio</i>	<i>20</i>
1.7.2 <i>Fuentes de Información</i>	<i>20</i>
1.7.3 <i>Etapas de Desarrollo</i>	<i>21</i>
1.8 ALCANCE, SUPUESTOS Y LIMITACIONES	23
1.8.1 <i>Alcance y exclusiones.....</i>	<i>23</i>
1.8.2 <i>Tratamiento de datos y confidencialidad.....</i>	<i>23</i>
1.8.3 <i>Supuestos principales.....</i>	<i>24</i>
1.8.4 <i>Limitaciones relevantes</i>	<i>25</i>
1.9 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	25
2 MARCO TEÓRICO.....	27
2.1 CONTEXTO 3PL Y FULFILLMENT DE COMERCIO ELECTRÓNICO	27
2.2 LA PREPARACIÓN DE PEDIDOS COMO PROCESO CRÍTICO	28
2.3 POLÍTICAS DE PREPARACIÓN Y NECESIDAD DE CLASIFICACIÓN	30
2.3.1 <i>Políticas principales de preparación</i>	<i>30</i>

2.3.2	<i>Agrupación y Ruteo de Órdenes</i>	30
2.3.3	<i>La Clasificación como Consecuencia de la Preparación por Lotes</i>	31
2.4	ESTRATEGIAS Y TECNOLOGÍAS DE CLASIFICACIÓN	32
2.4.1	<i>Clasificar Durante o Después de la Recolección</i>	32
2.4.2	<i>Espectro de Tecnologías para la Clasificación Posterior</i>	32
2.5	SISTEMAS ASISTIDOS POR LUZ	33
2.5.1	<i>Pick to Light y Put to Light</i>	33
2.5.2	<i>Arquitectura Funcional del Put to Light</i>	33
2.5.3	<i>Desempeño Reportado y Limitaciones</i>	34
2.6	CRITERIOS DE SELECCIÓN TECNOLÓGICA	35
2.6.1	<i>Síntesis comparativa de alternativas</i>	36
2.6.2	<i>Comparación Multicriterio de Alternativas</i>	37
2.6.3	<i>Brecha de Aplicación y Contribución del Trabajo.</i>	38
2.7	CAPACIDAD, UTILIZACIÓN Y RESTRICCIÓN DEL PROCESO.	39
2.7.1	<i>Capacidad y Restricción</i>	39
2.8	LEY DE LITTLE	40
2.9	ESTUDIO DEL TRABAJO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE TIEMPO.....	41
2.10	MEDICIÓN DE PRODUCTIVIDAD MEDIANTE REGISTROS TRANSACCIONALES	41
2.11	VALIDACIÓN EX-POST DEL PROCEDIMIENTO DE DIMENSIONAMIENTO.....	42
2.12	EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO.....	43
2.12.1	<i>Flujo Incremental e Indicadores</i>	43
2.12.2	<i>Tratamiento de la Incertidumbre</i>	44
2.13	CRITERIOS ERGONÓMICOS PARA EL DISEÑO DE LA ESTACIÓN.....	44
2.14	SÍNTESIS Y CORRESPONDENCIA CON LOS CAPÍTULOS DE APLICACIÓN	45
3	DIAGNÓSTICO DE LA OPERACIÓN ACTUAL	47
3.1	CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA.....	47
3.1.1	<i>Volumen y Estructura</i>	47
3.1.2	<i>Composición Según Número de Referencias</i>	48
3.1.3	<i>Estacionalidad y Comportamiento en Campaña</i>	49
3.1.4	<i>Canales y ventanas de despacho</i>	50
3.2	INFRAESTRUCTURA, RECURSOS Y SISTEMAS DE APOYO.....	51
3.2.1	<i>Estructura de Almacenamiento y Traslado Vertical</i>	51
3.2.2	<i>Recursos Humanos y Jornada</i>	51
3.2.3	<i>Sistemas de Información y Soportes</i>	52
3.3	PROCESO ACTUAL DE PREPARACIÓN DE PEDIDOS (AS-IS)	52

3.3.1	<i>Recolección por Lote</i>	53
3.3.2	<i>Clasificación, Emisión documental y Empaque</i>	53
3.4	LÍNEA BASE DE DESEMPEÑO	54
3.5	ANÁLISIS DE RESTRICCIONES Y CAUSAS OPERACIONALES	55
3.5.1	<i>Acoplamiento entre cierre de grupo y emisión documental</i>	57
3.5.2	<i>Dependencia de la Conformación Manual</i>	57
3.5.3	<i>Comportamiento Combinado Durante Campaña</i>	57
3.6	BRECHAS IDENTIFICADAS Y PRIORIZACIÓN	58
3.7	REQUERIMIENTOS DERIVADOS PARA LA SOLUCIÓN	59
4	DISEÑO DE LA PROPUESTA	60
4.1	ENFOQUE GENERAL Y CRITERIOS DE DISEÑO	60
4.2	ARQUITECTURA FUNCIONAL DE LA SOLUCIÓN	61
4.2.1	<i>Flujo Operativo Objetivo (TO-BE)</i>	62
4.2.2	<i>Integración Funcional</i>	63
4.3	REGLAS DE OPERACIÓN	64
4.3.1	<i>Tratamientos Según Composición del Pedido</i>	64
4.3.2	<i>Asignación de Estaciones y Posiciones</i>	65
4.3.3	<i>Gestión de Excepciones y Buffer</i>	65
4.4	DIMENSIONAMIENTO	66
4.4.1	<i>Parámetros de Diseño</i>	66
4.4.2	<i>Número de Estaciones: Capacidad de Procesamiento</i>	66
4.4.3	<i>Número de Posiciones: Aplicación de la Ley de Little</i>	68
4.4.4	<i>Tiempo de Residencia y Verificación de Posiciones</i>	69
4.4.5	<i>Configuración Adoptada</i>	70
4.4.6	<i>Escalabilidad en el Horizonte</i>	70
4.5	CONFIGURACIÓN FÍSICA Y ERGONÓMICA	71
4.6	CORRESPONDENCIA ENTRE BRECHAS Y ELEMENTO DEL DISEÑO	71
5	VALIDACIÓN DEL DIMENSIONAMIENTO Y EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO	73
5.1	BASE DE CONTRASTE Y TRATAMIENTO DE LOS DATOS	73
5.2	CONSTRUCCIÓN DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO	74
5.3	CONTRASTE DE LOS PARÁMETROS DE DEMANDA	75
5.4	CONTRASTE DE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO	76
5.5	UTILIZACIÓN OBSERVADA Y DESPLAZAMIENTO DE LA RESTRICCIÓN	77
5.6	CONTRASTE DE LA CONFIGURACIÓN DIMENSIONADA	78

6	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	80
6.1	CRITERIO DE EVALUACIÓN Y TRATAMIENTO DE LA CONFIDENCIALIDAD	80
6.2	ESCENARIO SIN PROYECTO	81
6.3	INVERSIÓN Y COSTOS OPERACIONALES	82
6.3.1	<i>Inversión inicial</i>	82
6.3.2	<i>Costos operacionales incrementales</i>	82
6.4	BENEFICIOS INCREMENTALES	83
6.4.1	<i>Dotación y sobre costos de campaña evitados</i>	83
6.4.2	<i>Reducción de errores de despacho</i>	83
6.4.3	<i>Costo unitario del error</i>	84
6.4.4	<i>Liberación de tiempo de supervisión</i>	84
6.5	FLUJO DE CAJA E INDICADORES DE RENTABILIDAD	85
6.6	ANÁLISIS DE RIESGO	86
6.6.1	<i>Sensibilidad y escenarios</i>	86
6.6.2	<i>Valores umbral</i>	88
6.7	COMPOSICIÓN DEL VALOR Y DISCUSIÓN.....	88
6.8	LIMITACIONES DE LA EVALUACIÓN	89
7	COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS	90
7.1	ALCANCE Y ALTERNATIVAS CONSIDERADAS	90
7.2	CRITERIOS Y PONDERACIÓN	91
7.3	ESCALA DE VALORACIÓN Y MATRIZ DE EVALUACIÓN	92
7.4	RESULTADOS DE LA PONDERACIÓN BASE.....	92
7.5	ROBUSTEZ DEL RESULTADO	93
7.5.1	<i>Variación aleatoria de los pesos</i>	93
7.5.2	<i>Escenarios de ponderación alternativos</i>	94
7.6	DISCUSIÓN DE LAS ALTERNATIVAS	94
7.7	CIERRE.....	95
8	CONCLUSIONES.....	97
8.1	CONCLUSIONES POR OBJETIVO ESPECÍFICO.....	97
8.1.1	<i>Primer objetivo: sistematizar el estado del arte y establecer criterios de selección tecnológica</i>	97
8.1.2	<i>Segundo objetivo: caracterizar el proceso actual, establecer la línea base y priorizar las brechas</i>	98
8.1.3	<i>Tercer objetivo: diseñar y dimensionar la solución Put to Light</i>	98

8.1.4	<i>Cuarto objetivo: contrastar el dimensionamiento con el comportamiento observado</i>	99
8.1.5	<i>Quinto objetivo: evaluar la viabilidad económica y contrastar alternativas tecnológicas</i>	100
8.2	RESPUESTA A LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	101
8.3	CONTRIBUCIONES DEL TRABAJO	103
8.3.1	<i>Arquitectura de capacidad permanente y modular</i>	103
8.3.2	<i>Validación ex-post del procedimiento de dimensionamiento</i>	103
8.3.3	<i>Integración del costo de la no calidad en la evaluación</i>	103
8.3.4	<i>Identificación de una cadena causal entre infraestructura y clasificación</i>	103
8.4	LIMITACIONES	104
8.5	RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.....	105
8.5.1	<i>Para la operación</i>	105
8.5.2	<i>Para trabajo futuro</i>	105
8.6	SÍNTESIS DE RESULTADOS.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		108

Índice de Figuras

FIGURA 1.1: FLUJO SIMPLIFICADO DEL ESCENARIO ACTUAL Y UBICACIÓN DE LOS PRINCIPALES PUNTOS CRÍTICOS.	14
FIGURA 1.2: CONTRASTE ENTRE EL PROMEDIO DE PEDIDOS POR DÍA Y EL MÁXIMO INGRESO DIARIO OBSERVADO.	16
FIGURA 1.3: FLUJOGRAMA DE LAS ETAPAS METODOLÓGICAS DEL ESTUDIO.....	21
FIGURA 2.1: RELACIÓN ENTRE LA POLÍTICA DE PREPARACIÓN, LA ESTRATEGIA DE CLASIFICACIÓN Y LA TECNOLOGÍA DE APOYO.	29
FIGURA 3.1: PARTICIPACIÓN MULTI-SKU SEGÚN NIVEL DE MEDICIÓN.....	49
FIGURA 3.2: FLUJO ACTUAL (AS-IS) Y PRINCIPALES PUNTOS CRÍTICOS.....	54
FIGURA 4.1: ARQUITECTURA FUNCIONAL SIMPLIFICADA DE LA SOLUCIÓN PTL.	62
FIGURA 4.2: FLUJO OPERATIVO OBJETIVO (TO-BE).	63
FIGURA 5.1: COMPOSICIÓN DE LA VENTANA OPERATIVA OBSERVADA DE LAS ESTACIONES PTL.	75
FIGURA 7.1: RESULTADO DEL ANÁLISIS MULTICRITERIO BAJO LA PONDERACIÓN BASE.	93

Índice de Tablas

TABLA 1.1: OBJETIVOS ESPECÍFICOS Y CORRESPONDENCIA CON LA ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	19
TABLA 2.1: CRITERIOS DE SELECCIÓN TECNOLÓGICA UTILIZADOS POSTERIORMENTE EN EL ANÁLISIS MULTICRITERIO.....	35
TABLA 2.2: SÍNTESIS CUALITATIVA DE ALTERNATIVAS DE CLASIFICACIÓN.	36
TABLA 2.3: SÍNTESIS DE LAS HERRAMIENTAS DEL MARCO TEÓRICO Y SU CORRESPONDENCIA CON LOS CAPÍTULOS DE APLICACIÓN.	45
TABLA 3.1: CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA.	48
TABLA 3.2: PARTICIPACIÓN MONO-SKU Y MULTI-SKU SEGÚN NIVEL DE MEDICIÓN.....	48
TABLA 3.3: CANALES, PARTICIPACIÓN Y VENTANAS DE CORTE DE DESPACHO.....	50
TABLA 3.4: LÍNEA BASE DE DESEMPEÑO.	55
TABLA 3.5: BRECHAS IDENTIFICADAS Y PRIORIZACIÓN.	58
TABLA 4.1: INTERCAMBIO DE INFORMACIÓN ENTRE EL SISTEMA DE GESTIÓN Y EL SISTEMA PTL.....	64
TABLA 4.2: TRATAMIENTO OPERATIVO SEGÚN COMPOSICIÓN DEL PEDIDO.....	64
TABLA 4.3: PARÁMETROS DE DISEÑO UTILIZADOS EN EL DIMENSIONAMIENTO.	66
TABLA 4.4: NÚMERO DE ESTACIONES REQUERIDO SEGÚN CONDICIÓN DE DEMANDA.	67
TABLA 4.5: CONTRASTE DE CONFIGURACIONES ALTERNATIVAS DE ESTACIONES BAJO LA CONDICIÓN DE MÁXIMO HISTÓRICO DE INGRESO.	67
TABLA 4.6: POSICIONES CON INDICADOR REQUERIDAS SEGÚN LA LEY DE LITTLE.	69
TABLA 4.7: CONFIGURACIÓN ADOPTADA DE LA SOLUCIÓN PTL.....	70
TABLA 4.8: CORRESPONDENCIA ENTRE BRECHAS PRIORIZADAS Y ELEMENTOS DEL DISEÑO.	72
TABLA 5.1: CONTRASTE DE LOS PARÁMETROS DE COMPOSICIÓN DE LA DEMANDA.	75
TABLA 5.2: CONTRASTE DE LOS PARÁMETROS DE DESEMPEÑO UTILIZADOS EN EL DISEÑO.	76

TABLA 5.3: CONTRASTE ENTRE LA CONFIGURACIÓN PROPUESTA Y LA IMPLEMENTACIÓN OBSERVADA.....	78
TABLA 6.1: COMPOSICIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL.....	82
TABLA 6.2: FLUJO DE CAJA INCREMENTAL DEL ESCENARIO BASE (CLP).....	85
TABLA 6.3: INDICADORES DE RENTABILIDAD DEL ESCENARIO BASE.....	85
TABLA 6.4: SENSIBILIDAD UNIVARIANTE DEL FLUJO ESCENARIO BASE.	86
TABLA 6.5: ESCENARIOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	87
TABLA 6.6: VALORES UMBRAL DEL ESCENARIO BASE.....	88
TABLA 6.7: PARTICIPACIÓN DE LOS BENEFICIOS EN VALOR PRESENTE DEL ESCENARIO BASE.	88
TABLA 7.1: CRITERIOS DE EVALUACIÓN Y PONDERACIÓN BASE.....	91
TABLA 7.2: MATRIZ DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO.....	92
TABLA 7.3: PUNTAJE PONDERADO Y ORDENAMIENTO.	92
TABLA 7.4: ORDENAMIENTO BAJO ESCENARIOS DE PONDERACIÓN ALTERNATIVOS.....	94
TABLA 8.1: SÍNTESIS DE RESULTADOS POR DIMENSIÓN.	106

1 Introducción

1.1 Contexto y Antecedentes

El comercio electrónico ha modificado de manera estructural las exigencias sobre las operaciones de almacenamiento y distribución. A diferencia de los canales tradicionales, el fulfillment e-commerce se caracteriza por un gran número de pedidos de baja profundidad, pequeñas cantidades por línea y elevada presión temporal, condiciones que han impulsado cambios tanto en las políticas operacionales como en las tecnologías utilizadas dentro de los centros de distribución (Boysen et al., 2019).

Dentro de este contexto, la preparación de pedidos constituye una de las actividades más intensivas en recursos de un almacén. La literatura especializada estima que el order picking puede representar hasta aproximadamente el 55 % de los costos operacionales del almacén, debido principalmente a la intensidad de mano de obra y a los desplazamientos requeridos para localizar y recolectar los productos (de Koster et al., 2007). Por ello, las mejoras sobre esta etapa tienen un efecto directo sobre la productividad, el nivel de servicio y el costo operacional.

En la operación estudiada, correspondiente al fulfillment del canal de comercio electrónico de un cliente del rubro vestuario administrado por un operador logístico 3PL en la Región Metropolitana, la complejidad se incrementa por la alta segmentación del surtido en combinaciones de modelo, talla y color. El proceso dispone de un sistema de gestión empresarial, terminales de radiofrecuencia y una política de preparación por lotes. Sin embargo, dos actividades relevantes permanecen fuera del soporte tecnológico: la conformación de los grupos de preparación y la clasificación posterior de los productos por pedido.

1.2 Problema de Investigación

La operación prepara los pedidos mediante una política de batch picking. Los pedidos se agrupan en carros y los operarios recolectan simultáneamente las referencias de múltiples órdenes apoyados por radiofrecuencia. Esta política reduce recorridos respecto de una preparación discreta, pero genera una consecuencia operacional inevitable: al finalizar la recolección, el flujo organizado por producto debe transformarse nuevamente en un flujo organizado por pedido. En el escenario actual, esta transformación se ejecuta principalmente de manera manual.

1.2.1 Clasificación posterior a la recolección sin asistencia

Al arribar los carros a la zona de estaciones, los operarios deben identificar a qué pedido corresponde cada unidad y reconstruir físicamente las órdenes. La tarea se ejecuta sin guiado visual sobre la posición de destino y sin confirmación positiva de cada depositación. La dificultad aumenta cuando las referencias de un mismo pedido llegan separadas en el tiempo, condición asociada a la recolección fraccionada por nivel que la operación utiliza para reducir el uso del equipo de traslado vertical.

Esta configuración genera búsqueda visual, manipulación redundante y acumulación de pedidos incompletos, y concentra una parte relevante de la exigencia cognitiva de la etapa de preparación.

1.2.2 Emisión documental condicionada al cierre del grupo

La factura y la etiqueta de despacho no se generan necesariamente cuando un pedido individual queda físicamente completo, sino cuando se procesa la totalidad del grupo de preparación. Como consecuencia, pedidos ya finalizados permanecen retenidos hasta que se resuelve la orden más lenta del conjunto, acoplando el tiempo de ciclo de pedidos que no presentan dependencia entre sí.

1.2.3 Conformación manual de los grupos de preparación

La conformación de los grupos se realiza mediante una planilla de cálculo administrada por la supervisión. La actividad depende del criterio de una persona, carece de optimización sistemática por proximidad de ubicaciones y aumenta su carga administrativa con el volumen. Además de su impacto sobre los recorridos, esta forma de trabajo configura una dependencia de recurso único y limita la trazabilidad de las reglas utilizadas para distribuir la carga.

La Figura 1.1 presenta el flujo simplificado del escenario actual e indica la ubicación de los principales puntos críticos descritos.

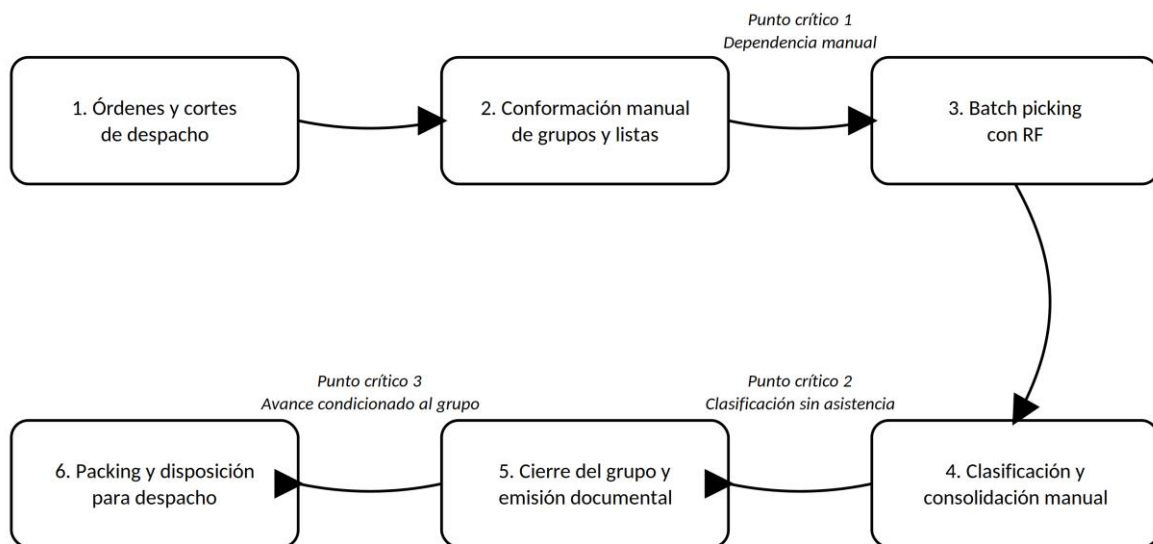


Figura 1.1: Flujo simplificado del escenario actual y ubicación de los principales puntos críticos.

Fuente: Elaboración propia a partir del levantamiento del proceso de la operación estudiada.

La propuesta interviene principalmente los puntos críticos 1, 2 y 3 sin modificar la política de batch picking.

1.2.4 Manifestación agregada del problema

Los efectos del proceso se manifiestan principalmente en exactitud y capacidad de respuesta. La operación estima que entre el 2 % y el 3 % de los pedidos presenta alguna incidencia de despacho en régimen ordinario, proporción que puede alcanzar aproximadamente el 4 % durante períodos de campaña. Este indicador corresponde a una estimación operacional y no a un registro sistemático de causas, por lo que debe interpretarse como línea base referencial y no como una medición atribuible exclusivamente a la clasificación.

En términos de volumen, los registros de doce meses muestran un promedio aproximado de 795 órdenes procesadas por día operativo. El máximo ingreso diario observado alcanzó 9.590 órdenes, equivalente a cerca de 12,1 veces dicho nivel. Durante el último evento de alta intensidad, la evacuación completa de la demanda requirió seis días operativos, con incorporación de personal adicional, horas extraordinarias y operación durante los sábados. La respuesta del sistema frente al peak consiste, por tanto, en diferir trabajo hacia jornadas posteriores más que en aumentar la producción de manera proporcional al ingreso.

La Figura 1.2 contrasta el promedio de pedidos por día operativo con el máximo ingreso diario observado en un periodo de un año.

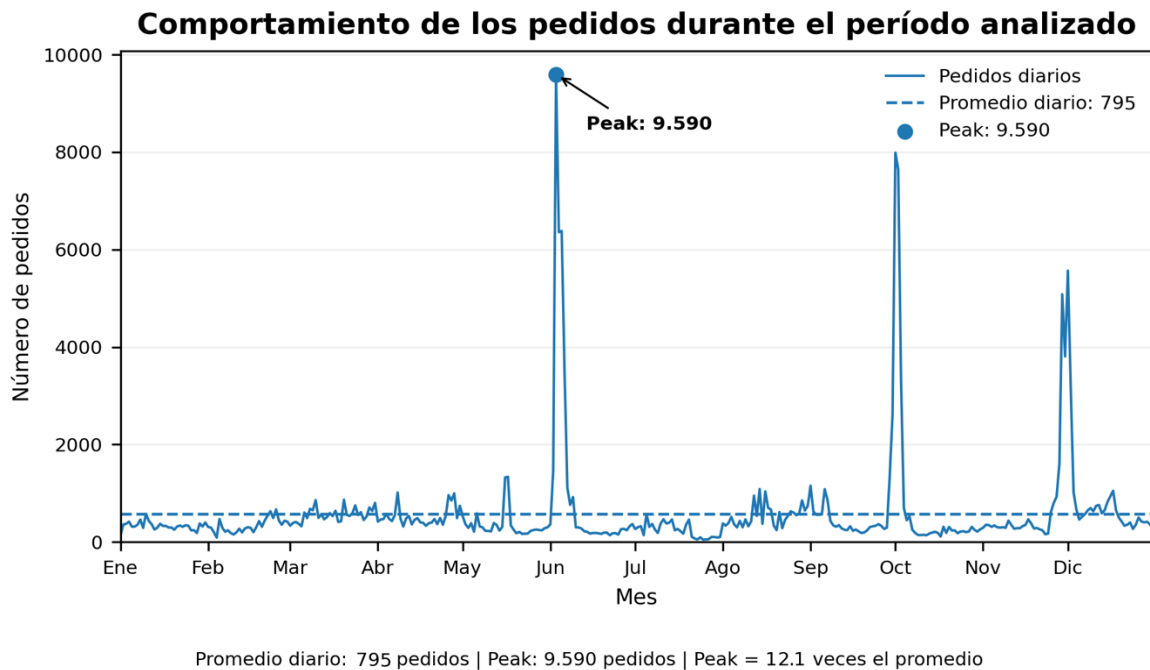


Figura 1.2: Contraste entre el promedio de pedidos por día y el máximo ingreso diario observado.
Fuente: Elaboración propia a partir de los registros transaccionales de doce meses de la operación estudiada.

En síntesis, el problema no se explica únicamente por una insuficiencia de recursos. La política de preparación por lotes requiere una etapa de clasificación que actualmente carece de asistencia específica; simultáneamente, la lógica documental condiciona el avance del pedido al cierre del grupo y la conformación de las listas depende de una actividad manual. La solución evaluada se orienta a intervenir estas condiciones sin modificar la política de batch picking ni la infraestructura principal de almacenamiento.

Para intervenir estas condiciones se evalúa un sistema Put to Light (PTL), tecnología de clasificación asistida en la que cada pedido se asigna a una posición física de una estación provista de un indicador luminoso. Cuando el operario identifica una unidad, el sistema señala la posición que corresponde a su pedido y registra la confirmación de la depositación. La posición permanece asignada hasta que el pedido se completa, por lo que admite que sus referencias lleguen en momentos distintos, y el pedido puede liberarse para su documentación y despacho sin esperar el cierre del grupo. De este

modo, el PTL actúa directamente sobre la etapa de clasificación posterior a la recolección, sin modificar la política de batch picking.

1.3 Pregunta de Investigación

A partir del problema descrito, la investigación se orienta por la siguiente pregunta principal:

¿En qué medida la implementación de un sistema Put to Light en la etapa de clasificación y consolidación de pedidos de una operación logística 3PL de fulfillment e-commerce permite mejorar el desempeño operativo y la exactitud del proceso, y bajo qué condiciones de demanda, dimensionamiento e inversión resulta económicamente viable frente al proceso actual basado en preparación por lotes con clasificación manual?

1.4 Justificación y Relevancia

La relevancia operacional del trabajo radica en que el problema afecta simultáneamente la exactitud, el tiempo de permanencia de los pedidos en proceso y la capacidad de respuesta ante incrementos de demanda. En régimen ordinario, una tasa de error estimada entre 2 % y 3 % implica miles de incidencias anuales potencialmente asociadas a reproceso y logística inversa; durante campaña, el deterioro del indicador coincide con el momento en que la operación enfrenta su mayor presión de volumen. A ello se suma el diferimiento del procesamiento, que compromete los plazos de despacho precisamente durante los eventos de mayor importancia comercial.

Desde una perspectiva de diseño, el caso presenta una estacionalidad extrema: el día de mayor ingreso supera en más de un orden de magnitud la producción de un día operativo promedio. Esta condición obliga a evitar dos extremos igualmente inconvenientes: diseñar una configuración permanente para el máximo absoluto, con elevada capacidad ociosa

durante la mayor parte del año, o dimensionar únicamente sobre el régimen ordinario y aceptar saturación durante los eventos de campaña. El trabajo aborda este dilema mediante una arquitectura de capacidad permanente complementada por módulos que se incorporan durante los períodos de mayor demanda.

Desde la perspectiva metodológica, el estudio integra diagnóstico de procesos, análisis de capacidad, dimensionamiento de estaciones, evaluación económica y comparación multicriterio de alternativas. Adicionalmente, durante el desarrollo de la investigación la solución fue implementada en la operación real, lo que permitió disponer de 98.333 confirmaciones unitarias correspondientes a los primeros cuatro meses de funcionamiento. Esta circunstancia habilita una validación ex-post del procedimiento de dimensionamiento, contrastando sus supuestos con el comportamiento efectivamente observado.

1.5 Objetivo General

Evaluar la factibilidad técnica, operativa y económica de implementar un sistema Put to Light en la etapa de clasificación y consolidación de pedidos del canal de comercio electrónico de una operación logística 3PL que actualmente ejecuta dicha etapa de manera manual, con el fin de determinar en qué medida su incorporación mejora el desempeño operativo y la exactitud del proceso, y bajo qué condiciones resulta económicamente viable frente al proceso actual.

1.6 Objetivos Específicos

Para alcanzar el objetivo general se definen los siguientes objetivos específicos:

Tabla 1.1: Objetivos específicos y correspondencia con la estructura del documento.

N°	Objetivo específico	Capítulo de aplicación
1	Sistematizar el estado del arte en tecnologías de apoyo a la preparación y clasificación de pedidos, con el fin de establecer criterios técnicos, operativos y económicos que sustenten la selección tecnológica y su posterior comparación con alternativas.	Capítulo 2
2	Caracterizar el proceso actual de preparación de pedidos, establecer una línea base cuantitativa de desempeño y priorizar las brechas identificadas según su impacto operativo y su factibilidad de mejora, con el fin de orientar el diseño de la solución hacia las brechas de mayor relevancia.	Capítulo 3
3	Diseñar la solución objetivo basada en un sistema Put to Light, dimensionando estaciones y posiciones, definiendo las reglas de operación e integrándola funcionalmente con los sistemas existentes, de manera que la solución sea implementable en la operación real y responda a las brechas identificadas en el diagnóstico.	Capítulo 4
4	Contrastar el dimensionamiento propuesto y sus parámetros de desempeño con el comportamiento observado del sistema en operación, con el fin de establecer la validez y las limitaciones del procedimiento empleado.	Capítulo 5
5	Evaluar la viabilidad económica del proyecto mediante indicadores de rentabilidad y contrastar la solución propuesta con alternativas tecnológicas mediante análisis multicriterio, con el fin de sustentar la decisión de inversión y la selección tecnológica final.	Capítulos 6 y 7

Fuente: Elaboración propia.

1.7 Metodología

1.7.1 Tipo y Enfoque del Estudio

El trabajo corresponde a un estudio de caso único, aplicado y de alcance descriptivo-evaluativo, desarrollado bajo un enfoque predominantemente cuantitativo con apoyo cualitativo. La unidad de análisis comprende el proceso de preparación, clasificación y consolidación de pedidos del canal de comercio electrónico de la operación estudiada. El rediseño se focaliza en la clasificación y en la lógica de avance del pedido, mientras que la recolección por lotes y el proceso de empaque se mantienen como interfaces del sistema y no son objeto de rediseño integral.

El estudio fue concebido inicialmente como una evaluación previa a una decisión de inversión. La implementación de la solución durante el período de desarrollo permitió sustituir la estimación puramente prospectiva del desempeño por una validación ex-post del dimensionamiento y de sus principales supuestos. Este cambio no altera el objeto de evaluación, sino que fortalece la capacidad de contrastar el procedimiento empleado con evidencia operacional real.

1.7.2 Fuentes de Información

La investigación combina cuatro fuentes principales de información:

- Registros transaccionales de doce meses previos a la implementación, utilizados para caracterizar órdenes, líneas, unidades, estacionalidad y composición de la demanda.
- Registro transaccional del sistema Put to Light en operación, compuesto por 98.333 confirmaciones unitarias entre el 1 de abril y el 27 de julio de 2026, utilizado para contrastar la caracterización de demanda, los parámetros de desempeño y la configuración dimensionada.

- Entrevistas semiestructuradas, observación directa del proceso en terreno y levantamiento con jefatura, supervisión y personal operativo, destinados a documentar reglas de trabajo, excepciones y prácticas no registradas en los sistemas.
- Fuentes secundarias: literatura académica y documentación técnica de proveedores, utilizadas para construir el estado del arte, fundamentar las herramientas analíticas y establecer rangos de referencia sujetos a análisis de sensibilidad.

1.7.3 Etapas de Desarrollo

El desarrollo del trabajo se organiza en cinco etapas metodológicas secuenciales, que se ilustran en la Figura 1.3 y se describen a continuación. Cada etapa aborda directamente uno de los cinco objetivos específicos definidos en la Tabla 1.1, en el mismo orden: el estado del arte corresponde al objetivo 1, el diagnóstico al objetivo 2, el diseño de la solución al objetivo 3, la validación ex-post al objetivo 4, y la evaluación y comparación al objetivo 5.

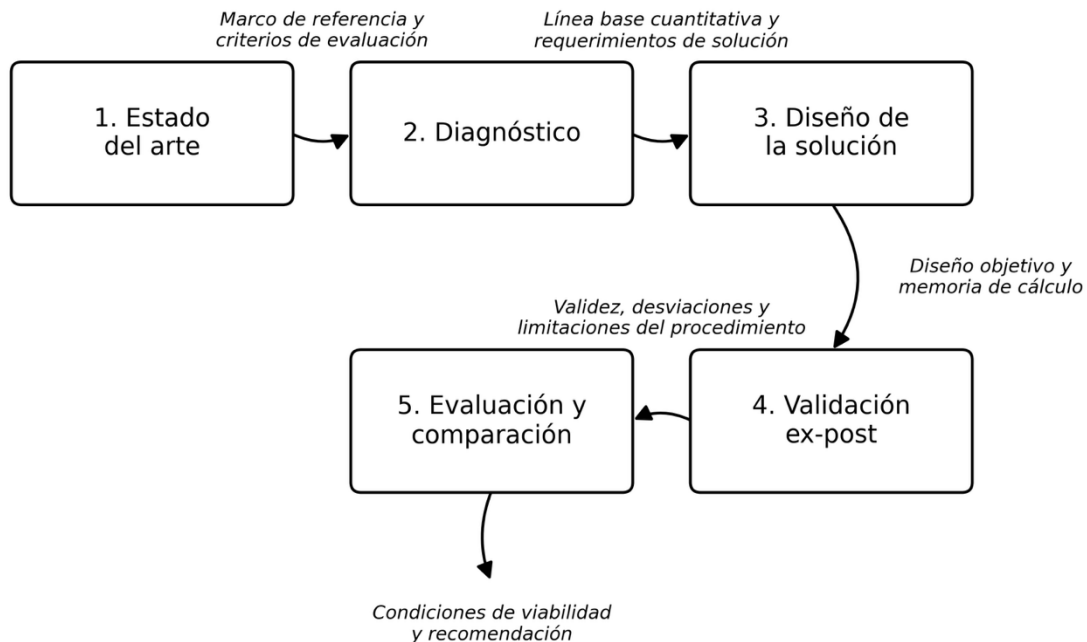


Figura 1.3: Flujograma de las etapas metodológicas del estudio.

Fuente: Elaboración propia.

1. **Estado del arte:** revisión de las políticas de preparación, las estrategias de clasificación y las tecnologías de apoyo disponibles mediante revisión documental, con el fin de definir los criterios de selección tecnológica que constituyen el marco de referencia del trabajo.
2. **Diagnóstico:** caracterización de la demanda, los recursos y el flujo actual del proceso mediante análisis transaccional, entrevistas y estudio de tiempos, estableciendo la línea base cuantitativa y los requerimientos que orientan el diseño de la solución.
3. **Diseño de la solución:** definición de la arquitectura funcional, las reglas de operación y el dimensionamiento de estaciones y posiciones, aplicando análisis de capacidad, la ley de Little y criterios ergonómicos, lo que produce el diseño objetivo y su memoria de cálculo.
4. **Validación ex-post:** contraste del dimensionamiento propuesto y sus supuestos con el registro del sistema efectivamente implementado, mediante análisis transaccional y contraste ex-ante/ex-post, estableciendo la validez, las desviaciones y las limitaciones del procedimiento empleado.
5. **Evaluación y comparación:** construcción del flujo de caja incremental, análisis de sensibilidad y comparación de la solución con alternativas tecnológicas mediante análisis multicriterio, entregando las condiciones de viabilidad económica y la recomendación final del trabajo.

1.8 Alcance, Supuestos y Limitaciones

1.8.1 Alcance y exclusiones

El estudio se circunscribe al canal de comercio electrónico de un único cliente dentro de una operación logística 3PL localizada en la Región Metropolitana. El análisis comprende la generación de los grupos de preparación, la recolección por lotes como etapa precedente, la clasificación y consolidación de pedidos, y la interfaz con la emisión documental y el empaque.

Quedan fuera del alcance:

- La ejecución física, instalación y puesta en marcha del sistema, aunque su implementación real se utiliza posteriormente como fuente de validación.
- La especificación técnica detallada del desarrollo sobre el sistema de gestión empresarial y de las interfaces de software, abordadas únicamente a nivel funcional.
- El rediseño del proceso de empaque, de recepción, almacenamiento, reposición, inventario y logística inversa, salvo cuando dichos procesos condicionan directamente la preparación de pedidos.
- Canales y clientes distintos del caso de estudio, así como la gestión del cambio organizacional y la estructura de compensaciones.

1.8.2 Tratamiento de datos y confidencialidad

Los datos operacionales utilizados provienen de registros reales de la operación y se presentan mediante un factor de escala único y constante, no revelado, aplicado con fines de confidencialidad. Esta transformación modifica las magnitudes absolutas reportadas, pero conserva las relaciones internas relevantes para el análisis, incluyendo la composición de los pedidos, las proporciones entre órdenes, líneas y unidades, la estacionalidad y la relación entre períodos ordinarios y de alta demanda. En

consecuencia, los resultados operacionales deben interpretarse como correspondientes a una operación representativa cuya estructura y comportamiento relativo son equivalentes a los del caso real.

La transformación de confidencialidad se aplica exclusivamente a la presentación de los volúmenes operacionales. La evaluación económica se desarrolla sobre la escala real de la operación: la inversión, el soporte y los demás costos fijos mantienen sus valores efectivos, y los beneficios dependientes del volumen deben calcularse utilizando los volúmenes equivalentes de la operación real. De este modo, la anonimización de la información operacional no altera la evaluación de la conveniencia económica del proyecto.

1.8.3 Supuestos principales

La estructura de la demanda observada durante los doce meses analizados se mantiene representativa del comportamiento futuro del canal.

La demanda crece dentro de un rango de 10 % a 15 % anual, empleándose un escenario central de 12,5 % para el horizonte de cinco años y sometiendo los extremos a sensibilidad.

La operación mantiene un régimen base de un turno diario y utiliza extensiones de jornada y recursos temporales durante campañas, conforme a la configuración descrita en el diagnóstico.

La infraestructura principal de almacenamiento permanece sin modificaciones relevantes para el horizonte del análisis; la solución debe crecer mediante una arquitectura modular. Los parámetros de desempeño no disponibles antes de la implementación se estiman mediante estudio de tiempos, literatura técnica y supuestos explícitos; posteriormente se contrastan con el registro real cuando éste lo permite.

1.8.4 Limitaciones relevantes

El estudio corresponde a un caso único; por ello, la transferibilidad se sustenta en la estructura del problema y en el procedimiento de dimensionamiento, no en la generalización directa de los resultados numéricos.

La tasa de error de despacho del escenario actual corresponde a una estimación de la operación y no a un registro sistemático por causa. El registro postimplementación disponible tampoco permite medir directamente la tasa de error residual.

La validación ex-post se realiza sobre una única implementación y sobre aproximadamente cuatro meses de operación, período que incluye un evento de alta intensidad pero no un ciclo anual completo.

La capacidad efectiva del escenario sin proyecto no fue determinada mediante una prueba independiente de saturación. En consecuencia, el nivel cercano a 800 órdenes/día se interpreta como producción observada bajo la configuración vigente y no como una capacidad máxima demostrada; su efecto sobre la dotación futura se trata como un supuesto de evaluación y se somete a sensibilidad.

La evaluación económica se desarrolla mediante un flujo de caja incremental a cinco años. Sus resultados dependen de los supuestos definidos para el escenario base, especialmente del costo unitario del error, de la reducción atribuible al sistema, del crecimiento de la demanda y de la evolución de la capacidad requerida; estos parámetros se analizan mediante sensibilidad, escenarios y valores umbral en el Capítulo 6.

1.9 Estructura del Documento

El documento se organiza en ocho capítulos. El Capítulo 1 presenta el contexto, el problema de investigación, la pregunta principal, los objetivos, la metodología y el alcance. El Capítulo 2 reúne el marco teórico del trabajo en dos bloques: el estado del arte sobre preparación de pedidos, estrategias de clasificación y tecnologías de apoyo,

junto con los criterios y el método de selección tecnológica; y las herramientas analíticas empleadas para el diagnóstico, el dimensionamiento, la validación y la evaluación económica.

El Capítulo 3 desarrolla el diagnóstico de la operación actual, caracterizando la demanda, los recursos, el flujo de trabajo, la línea base y las brechas prioritarias. El Capítulo 4 presenta el diseño de la solución Put to Light, incluyendo arquitectura funcional, reglas de operación, dimensionamiento y configuración física. El Capítulo 5 contrasta el dimensionamiento y sus supuestos con el registro transaccional del sistema implementado. El Capítulo 6 desarrolla la evaluación económica y el análisis de riesgo. El Capítulo 7 compara la solución con alternativas tecnológicas mediante análisis multicriterio. Finalmente, el Capítulo 8 presenta las conclusiones, las contribuciones, las limitaciones y las líneas de trabajo futuro.

2 Marco Teórico

El presente capítulo establece las bases conceptuales del trabajo. Reúne, por una parte, el conocimiento relevante sobre la preparación y clasificación de pedidos y las tecnologías disponibles para apoyarla; y, por otra, las herramientas analíticas que se emplean posteriormente para diagnosticar el proceso, dimensionar la solución, contrastar su desempeño y evaluar su conveniencia económica. El propósito no es describir exhaustivamente todas las tecnologías de automatización disponibles ni desarrollar herramientas sin aplicación explícita, sino construir un marco de referencia que permita distinguir las decisiones de método de las decisiones tecnológicas y fundamentar los criterios utilizados para diseñar, validar y comparar la solución Put to Light (PTL).

La exposición se organiza en dos bloques. El primero avanza desde lo general hacia lo específico: sitúa el caso en el contexto de la tercerización logística y del fulfillment de comercio electrónico, revisa las políticas de preparación de pedidos y la necesidad de clasificación que surge al trabajar por lotes, y examina las alternativas de apoyo a la clasificación junto con los criterios y el método que permiten compararlas. El segundo reúne las herramientas analíticas aplicadas en los capítulos posteriores: análisis de capacidad y utilización, ley de Little, estudio y medición del trabajo, medición de productividad mediante registros transaccionales, validación ex-post, evaluación económica y análisis de incertidumbre, además de los criterios ergonómicos para el diseño físico de la estación.

2.1 Contexto 3PL y fulfillment de comercio electrónico

La logística de terceros o Third-Party Logistics (3PL) corresponde a la externalización, total o parcial, de actividades logísticas hacia un proveedor especializado. La literatura incluye dentro de este ámbito servicios como transporte, almacenamiento, gestión de inventario, preparación de pedidos y actividades de valor agregado, ejecutadas bajo una relación contractual con el cliente (Marasco, 2008). Para el presente trabajo, el

interés se concentra en el nivel operativo de esa relación: la ejecución del fulfillment dentro del centro de distribución.

El comercio electrónico aumenta la exigencia sobre esta operación. Los centros de distribución orientados a e-commerce deben procesar grandes cantidades de órdenes sensibles al tiempo, normalmente con pocas líneas y bajas cantidades por línea, lo que incrementa la frecuencia de las operaciones de picking, clasificación y despacho (Boysen et al., 2019). Para un operador 3PL, esta configuración agrega una tensión adicional: debe absorber variaciones importantes de demanda y cumplir niveles de servicio comprometidos con el cliente sin mantener permanentemente la estructura de recursos requerida por los períodos de máxima actividad.

En consecuencia, el problema tecnológico no consiste simplemente en aumentar el nivel de automatización, sino en seleccionar una configuración compatible con el perfil de demanda, las restricciones físicas de la instalación y el nivel de inversión económicamente justificable.

2.2 La preparación de pedidos como proceso crítico

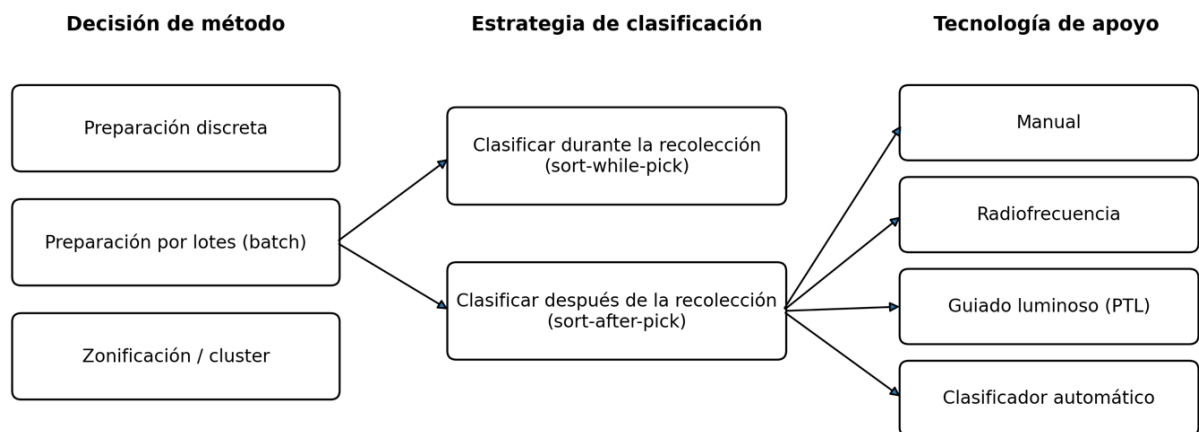
La preparación de pedidos (order picking) se reconoce como una de las actividades de mayor incidencia sobre el desempeño del almacén. En sistemas manuales puede representar hasta aproximadamente el 55 % de los costos operacionales, debido principalmente al uso intensivo de mano de obra y a los desplazamientos necesarios para recuperar los productos solicitados (de Koster et al., 2007).

El desempeño del picking no depende de una única decisión. La literatura distingue problemas de diseño y control relacionados con la asignación de ubicaciones, conformación de lotes, zonificación, ruteo, secuenciación y acumulación o clasificación de pedidos (de Koster et al., 2007; Gu et al., 2007). Revisiones más recientes muestran además una creciente integración entre estas políticas operacionales y distintos niveles

de automatización, particularmente en entornos de comercio electrónico (Casella et al., 2023; Pinto et al., 2023).

Esta distinción resulta central para la tesina. La operación estudiada ya utiliza preparación por lotes y terminales de radiofrecuencia durante la recolección; por tanto, el problema principal no es seleccionar nuevamente la política de picking, sino resolver tecnológicamente la clasificación posterior que dicha política hace necesaria.

La Figura 2.1 resume la relación entre la política de preparación, la estrategia de clasificación y la tecnología de apoyo.



El caso estudiado mantiene el batch picking y evalúa la tecnología para la clasificación posterior.

Figura 2.1: Relación entre la política de preparación, la estrategia de clasificación y la tecnología de apoyo.

Fuente: Elaboración propia a partir de de Koster et al. (2007), Gu et al. (2007) y Boysen et al. (2019).

2.3 Políticas de preparación y necesidad de clasificación

2.3.1 Políticas principales de preparación

En la preparación discreta, un operario completa una orden antes de iniciar la siguiente. En la preparación por lotes o batch picking, en cambio, varias órdenes se agrupan y se recolectan dentro de un mismo recorrido. La zonificación divide el almacén entre áreas de trabajo, mientras que las configuraciones tipo cluster permiten preparar múltiples pedidos en paralelo utilizando contenedores diferenciados. Estas políticas pueden combinarse entre sí y su conveniencia depende del perfil de pedidos, la distribución del inventario y las restricciones físicas del almacén (de Koster et al., 2007; Boysen et al., 2019).

En operaciones con gran cantidad de pedidos de baja profundidad, el batching permite compartir el desplazamiento entre varias órdenes y reducir recorridos redundantes. Sin embargo, cuando los productos se recolectan de manera agregada, la reducción del tiempo de recorrido genera una necesidad adicional: volver a separar los productos por pedido antes del empaque. El beneficio del batch picking depende, por tanto, de que esta etapa de clasificación pueda ejecutarse con suficiente capacidad y exactitud.

2.3.2 Agrupación y Ruteo de Órdenes

La conformación de lotes determina qué órdenes se preparan conjuntamente, mientras que el ruteo define la secuencia de ubicaciones que el operario debe visitar. Ambas decisiones han sido ampliamente estudiadas como problemas de optimización y pueden generar reducciones relevantes de desplazamiento cuando se adaptan a la distribución en el almacén y a la composición de la demanda (de Koster et al., 2007; Gu et al., 2007).

En la práctica, la conformación de grupos debe considerar además restricciones operacionales como capacidad del carro, compatibilidad de canal y ventanas de corte. En sistemas de gestión modernos, estas reglas pueden incorporarse al software de planificación, trasladando parte de la decisión desde el juicio manual hacia parámetros configurables. En esta tesina, la optimización matemática del batching no constituye el objeto principal; se considera como una funcionalidad complementaria del rediseño y se concentra el análisis en la clasificación posterior.

2.3.3 La Clasificación como Consecuencia de la Preparación por Lotes

Cuando un lote se recolecta sin mantener físicamente separadas las órdenes, el flujo resultante queda organizado por producto y debe transformarse nuevamente en un flujo organizado por pedido. La literatura reconoce esta acumulación y clasificación como una decisión propia del sistema de preparación, y distingue configuraciones en que la separación se realiza durante el recorrido de aquellas en que se ejecuta después de la recolección (de Koster et al., 2007; Gu et al., 2007).

La clasificación posterior introduce trabajo adicional de identificación, búsqueda, verificación y manipulación. Si se ejecuta manualmente, la dificultad crece con el tamaño del lote y con la dispersión temporal de las referencias que componen una misma orden. En consecuencia, el tamaño de lote económicamente atractivo desde el punto de vista del recorrido puede dejar de serlo si la etapa posterior no posee capacidad suficiente para separar y consolidar los pedidos.

Esta relación funcional es el puente entre método y tecnología que sustenta el caso estudiado: el batch picking constituye la política que reduce recorridos, mientras que la tecnología de clasificación debe permitir materializar ese beneficio sin trasladar la restricción hacia la consolidación.

2.4 Estrategias y tecnologías de clasificación

2.4.1 Clasificar Durante o Después de la Recolección

La estrategia sort-while-pick separa los productos mientras se ejecuta el recorrido, normalmente mediante contenedores diferenciados en el carro. Su principal ventaja es eliminar una etapa posterior de clasificación; a cambio, aumenta la complejidad de la tarea durante el picking y limita el tamaño del lote a la capacidad física de compartimentos transportables. La estrategia sort-after-pick o pick-and-sort recolecta el lote de forma agregada y ejecuta la separación posteriormente, permitiendo lotes mayores pero requiriendo capacidad específica de clasificación (de Koster et al., 2007; Gu et al., 2007). No existe una estrategia universalmente superior. La selección depende del ancho de los pasillos, tamaño de los carros, profundidad del pedido, dispersión de los productos y disponibilidad de tecnología en la etapa posterior. En el caso analizado, la operación actual corresponde a una configuración de clasificación posterior, por lo que las alternativas tecnológicas comparables son aquellas capaces de asistir o automatizar dicha etapa.

2.4.2 Espectro de Tecnologías para la Clasificación Posterior

La clasificación posterior puede ejecutarse con distintos grados de asistencia. En el extremo de menor inversión se encuentra la clasificación manual sobre mesón. Un nivel superior incorpora radiofrecuencia para identificar el destino de cada unidad. Los sistemas put to light agregan guiado visual directamente sobre la posición física de destino. Finalmente, clasificadores automáticos de bandeja o banda ejecutan la separación de manera mecanizada y se orientan a volúmenes y niveles de inversión sustancialmente mayores. La literatura técnica muestra que estas alternativas presentan compromisos diferentes entre inversión, productividad, exactitud, flexibilidad y superficie requerida (Wulfraat, 2013; Mecalux, 2024).

Los sistemas goods-to-person, robots móviles y otras arquitecturas de automatización avanzada son relevantes en el contexto general del e-commerce (Boysen et al., 2019), pero modifican directamente la etapa de almacenamiento y recolección. Por esa razón no se consideran alternativas equivalentes al problema específico de clasificación posterior abordado en esta tesina.

2.5 Sistemas Asistidos por Luz

2.5.1 Pick to Light y Put to Light

Los sistemas asistidos por luz utilizan indicadores luminosos y visualizadores asociados a ubicaciones físicas para dirigir una acción del operario y registrar su confirmación. En pick to light, los dispositivos se instalan en las ubicaciones de almacenamiento y guían la extracción de productos. En put to light, los indicadores se instalan en posiciones de destino y guían la depositación de los artículos previamente recolectados en el pedido correspondiente (Mecalux, 2024).

La diferencia es relevante para atribuir correctamente los beneficios. Un sistema put to light ubicado después del batch picking no reduce por sí mismo la distancia recorrida durante la recolección. Su efecto se concentra en la clasificación: sustituye la búsqueda e identificación manual del destino por una instrucción visual, incorpora una confirmación positiva de la depositación y permite registrar el estado de cada pedido. Esta lógica es coherente con los sistemas de orden inverso estudiados en la literatura, en los cuales un flujo de SKU se distribuye hacia múltiples órdenes mediante posiciones previamente asignadas (Füßler & Boysen, 2017; Boysen et al., 2020).

2.5.2 Arquitectura Funcional del Put to Light

Para efectos de este trabajo, la solución PTL se interpreta como un sistema compuesto por tres capas interdependientes. La primera corresponde a la orquestación

de software: recepción de grupos de preparación, asignación de pedidos a posiciones, gestión de estados, cierre de pedidos e integración documental. La segunda corresponde al guiado físico: indicadores luminosos, visualizadores, controladores y dispositivos de lectura. La tercera corresponde al método de trabajo: reglas de operación, tratamiento de excepciones, utilización de posiciones y relación entre clasificación y empaque.

Esta separación permite evitar una interpretación puramente instrumental de la tecnología. El hardware luminoso no genera por sí solo el beneficio esperado si la lógica del sistema mantiene el cierre documental por grupo o si la asignación de posiciones no permite recibir referencias de un mismo pedido en momentos distintos. De igual forma, una lógica de software más sofisticada difícilmente puede sostener grandes volúmenes si el operario continúa localizando manualmente las posiciones. La evaluación debe considerar, por tanto, equipamiento, integración y rediseño del método como partes de una única solución.

La literatura sobre put to light muestra que el desempeño depende de la configuración de posiciones, de la asignación de órdenes y de la secuencia con que los SKU llegan a la estación, por lo que el dimensionamiento y las reglas de operación forman parte del problema de diseño y no son decisiones independientes del sistema (Füßler & Boysen, 2017; Boysen et al., 2020).

2.5.3 Desempeño Reportado y Limitaciones

Las fuentes académicas y técnicas coinciden en que el guiado luminoso puede reducir el esfuerzo de identificación del operario y favorecer una ejecución rápida y estandarizada de la clasificación. La literatura técnica reporta además niveles elevados de productividad y exactitud para sistemas light-directed cuando la configuración se adapta al perfil de pedidos y existe integración adecuada con el sistema de gestión (Wulfraat, 2013; Mecalux, 2024).

Estos antecedentes deben interpretarse con cautela. Una parte relevante de los valores de productividad y exactitud disponibles proviene de proveedores y consultores, y suele

corresponder a condiciones favorables de operación. Por esa razón, en esta tesina dichos rangos se utilizan como referencias para el diseño y el análisis de sensibilidad, mientras que la validación del dimensionamiento se realiza posteriormente con el registro transaccional de la implementación real.

Entre las principales limitaciones se encuentran una inversión inicial superior a la clasificación manual o puramente RF, la necesidad de integración con el sistema de gestión, la dependencia de la calidad de los datos maestros y una menor flexibilidad física frente a soluciones totalmente móviles. Además, al tratarse de una tecnología asistida y no de una automatización completa, la ejecución sigue dependiendo del operario y conserva un riesgo residual de error (Wulfraat, 2013; Mecalux, 2024).

2.6 Criterios de Selección Tecnológica

La revisión precedente confirma que el nivel de automatización no constituye por sí mismo un criterio de superioridad. La tecnología adecuada depende de la combinación entre desempeño requerido, variabilidad de la demanda, restricciones físicas y capacidad de inversión. Para mantener consistencia con la comparación desarrollada en el Capítulo 7, se establecen los ocho criterios de evaluación indicados en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Criterios de selección tecnológica utilizados posteriormente en el análisis multicriterio.

N°	Criterio	Definición para el presente trabajo
1	Exactitud de la clasificación	Capacidad de reducir asignaciones o depositaciones incorrectas y proporcionar verificación de la acción.
2	Escalabilidad ante campaña	Capacidad de absorber incrementos temporales de volumen sin crecimiento proporcional de la estructura permanente.
3	Tolerancia a llegada fraccionada	Capacidad de mantener un pedido abierto y recibir sus referencias en momentos o contenedores diferentes.

N°	Criterio	Definición para el presente trabajo
4	Inversión inicial	CAPEX requerido para equipamiento, software, integración y puesta en marcha.
5	Costo operacional incremental	Costos recurrentes de soporte, mantenimiento, licencias y operación asociados a la alternativa.
6	Flexibilidad	Facilidad para adaptarse a cambios de surtido, perfil de pedido, canal o reglas de operación.
7	Superficie requerida	Espacio adicional y compatibilidad física con la instalación existente.
8	Plazo y complejidad de implementación	Tiempo, esfuerzo de integración, dependencia del proveedor y curva de puesta en marcha.

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura revisada y de los requerimientos del problema de estudio.

2.6.1 Síntesis comparativa de alternativas

A partir de los criterios anteriores, las principales alternativas que resuelven la etapa de clasificación posterior pueden ordenarse cualitativamente como se muestra en la Tabla 2.2. La tabla no pretende reemplazar el análisis multicriterio del Capítulo 7; su función es delimitar el espacio tecnológico y explicitar los principales compromisos identificados en la literatura.

Tabla 2.2: Síntesis cualitativa de alternativas de clasificación.

Alternativa	Inversión	Exactitud esperada	Escalabilidad	Tolerancia a fragmentación	Síntesis
Manual posterior	Muy baja	Baja	Baja	Alta	Baja inversión, pero mantiene la carga cognitiva y la dependencia del operario.

Alternativa	Inversión	Exactitud esperada	Escalabilidad	Tolerancia a fragmentación	Síntesis
Clasificación durante la recolección	Baja	Media	Baja	Baja	Elimina clasificación posterior, pero limita el lote por compartimentos y exige mantener el pedido unido durante el recorrido.
Asistida por radiofrecuencia	Baja	Media-alta	Media	Media	Aprovecha infraestructura existente; el destino se informa en pantalla, sin guiado físico directo.
Put to light	Media	Alta	Alta	Alta	Guiado visual directo, confirmación y asignación persistente de posiciones; requiere integración y equipamiento dedicado.
Clasificador automático	Alta	Alta	Muy alta	Alta	Capacidad elevada, pero con mayor inversión, superficie y rigidez de implementación.

Fuente: Elaboración propia a partir de de Koster et al. (2007), Boysen et al. (2019), Wulfraat (2013) y Mecalux (2024).

2.6.2 Comparación Multicriterio de Alternativas

La comparación tecnológica involucra criterios expresados en unidades diferentes, como los definidos en la Tabla 2.1, que no pueden agregarse directamente. Para estructurar esta decisión se utiliza un modelo de puntuación ponderada.

Sea s_{ij} la puntuación de la alternativa j en el criterio i y w_i el peso asignado a dicho criterio, con $\sum w_i = 1$. El puntaje total de cada alternativa se calcula como:

$$P_j = \sum (w_i \cdot s_{ij}) \quad (2.1)$$

El método permite explicitar las prioridades del caso y hacer transparente el efecto de los juicios de ponderación. Su principal limitación reside precisamente en la definición de los

pesos y de las puntuaciones; por ello, el ordenamiento debe acompañarse de análisis de sensibilidad que evalúe si la alternativa preferida se mantiene ante variaciones razonables de dichos valores.

En esta tesina no se desarrolla el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), dado que el Capítulo 7 utiliza puntuación ponderada y análisis de robustez. Mantener únicamente el método efectivamente aplicado evita introducir una herramienta que no interviene en los resultados.

2.6.3 Brecha de Aplicación y Contribución del Trabajo.

La literatura revisada proporciona un marco amplio para seleccionar políticas de picking, agrupar órdenes, diseñar estrategias de clasificación y configurar sistemas asistidos por luz. Sin embargo, el caso estudiado exige articular estos elementos bajo dos condiciones que adquieren especial relevancia práctica.

La primera corresponde al dimensionamiento frente a una demanda altamente estacional. Una instalación concebida únicamente para el promedio corre el riesgo de saturarse durante eventos comerciales, mientras que una instalación concebida como capacidad permanente para el máximo puede presentar utilización reducida durante gran parte del año. El problema, por tanto, no se limita a calcular una capacidad máxima: requiere decidir qué parte de esa capacidad debe permanecer activa en régimen ordinario y qué parte puede incorporarse modularmente en campaña.

La segunda condición corresponde a la valoración económica. En tecnologías de clasificación asistida, el beneficio no necesariamente se concentra en reducir dotación. La mejora puede provenir de la exactitud, de la reducción del costo de la no calidad, del desacoplamiento de pedidos y de la capacidad para absorber picos de demanda. Estos componentes deben incorporarse explícitamente al flujo económico para evitar una evaluación restringida exclusivamente a horas-hombre.

Sobre esta base, la contribución aplicada del trabajo consiste en integrar el diagnóstico de la restricción, el dimensionamiento de una arquitectura de capacidad permanente y modular, la validación ex-post con datos de operación real y una evaluación económica que incorpora el costo de los errores de despacho. Esta articulación permite establecer no solo si la tecnología es técnicamente viable, sino bajo qué condiciones operacionales y económicas resulta preferible frente a otras alternativas.

Las secciones anteriores delimitaron el espacio tecnológico y los criterios con que se compara una alternativa de clasificación. Las siguientes reúnen las herramientas analíticas que se utilizan para diagnosticar el proceso, dimensionar la solución, contrastar su desempeño y evaluar su conveniencia económica. La selección es deliberadamente acotada: se incluyen únicamente los conceptos que tienen una aplicación explícita en los capítulos siguientes.

2.7 Capacidad, Utilización y Restricción del Proceso.

2.7.1 Capacidad y Restricción

La capacidad de un proceso corresponde a la tasa de salida que puede sostener bajo una configuración determinada de recursos y método de trabajo. En procesos compuestos por etapas sucesivas, el desempeño global queda condicionado por la etapa con menor capacidad efectiva o por la regla de operación que limite el avance del flujo. Por esta razón, una mejora aplicada fuera de la restricción puede aumentar holgura local sin incrementar el throughput del sistema (Hopp & Spearman, 2008).

Para efectos del presente trabajo, la utilización se expresa como la relación entre la carga de trabajo exigida a un recurso y la capacidad disponible de dicho recurso:

$$\rho = \text{carga requerida} / \text{capacidad disponible} \quad (2.2)$$

Una utilización próxima a 1 implica escasa capacidad de absorción frente a variaciones de llegada, tiempos de servicio o interrupciones. En sistemas con variabilidad, la espera aumenta de manera no lineal a medida que disminuye la holgura, por lo que el dimensionamiento práctico requiere un margen respecto de la capacidad teórica máxima (Hopp & Spearman, 2008).

2.8 Ley de Little

La ley de Little relaciona el número promedio de entidades presentes en un sistema, la tasa promedio de llegada y el tiempo promedio de permanencia. Para un sistema estable, la relación se expresa como (Little, 1961):

$$L = \lambda \cdot W \quad (2.3)$$

donde L representa el número promedio de entidades en el sistema, λ la tasa promedio de llegada y W el tiempo promedio de permanencia. Su utilidad radica en que la relación no exige asumir una distribución específica para los tiempos de llegada o de servicio, siempre que los promedios correspondan a un sistema estable.

En esta tesina la ley se utiliza para dimensionar las posiciones de clasificación. Si se conoce la tasa a la que ingresan pedidos que requieren consolidación y el tiempo durante el cual cada uno mantiene ocupada una posición, el producto de ambas variables entrega la ocupación promedio esperada. Sobre ese promedio se aplica posteriormente un margen de diseño para absorber variabilidad.

El mismo principio se emplea en sentido inverso durante la validación ex-post: a partir del número de posiciones disponibles y del flujo efectivamente observado se estima el tiempo de residencia compatible con el reuso registrado.

2.9 Estudio del Trabajo y Construcción del Modelo de Tiempo

La comparación entre el escenario actual y la solución propuesta requiere representar el tiempo consumido por las actividades que componen el proceso. El estudio del trabajo proporciona una estructura para descomponer una operación en elementos observables y asignar a cada uno un tiempo representativo, permitiendo separar desplazamiento, búsqueda e identificación, toma, confirmación, clasificación y otras actividades de soporte (Freivalds & Niebel, 2014).

Cuando existe observación directa suficiente, un tiempo estándar puede construirse a partir del tiempo observado, una valoración del ritmo y suplementos asociados a necesidades personales, fatiga y contingencias. Conceptualmente:

$$T_e = T_o \cdot F_v \cdot (1 + S) \quad (2.4)$$

donde T_e es el tiempo estándar, T_o el tiempo observado, F_v el factor de valoración y S los suplementos. En el presente trabajo, sin embargo, no todos los elementos se obtienen mediante un estudio cronométrico independiente. Se utilizan los tiempos disponibles del estudio elaborado para el proyecto, complementados con distancias físicas, parámetros documentados y contrastes agregados con el desempeño observado.

2.10 Medición de Productividad Mediante Registros Transaccionales

La implementación del sistema de clasificación genera un registro con marca temporal para cada confirmación. Este nivel de granularidad permite distinguir dos dimensiones de desempeño que no deben confundirse: la velocidad con que el recurso trabaja cuando está activo y la proporción del tiempo en que efectivamente recibe trabajo.

La ventana operativa corresponde al intervalo entre el primer y el último registro de una estación durante una jornada. El tiempo efectivo corresponde a la suma de los intervalos

de actividad continua, excluyendo interrupciones prolongadas. Sobre estas bases se calculan tres indicadores principales:

- Ritmo efectivo: unidades confirmadas por hora efectiva de trabajo.
- Intervalo mediano entre confirmaciones: mediana del tiempo transcurrido entre confirmaciones consecutivas dentro de períodos de trabajo continuo.
- Utilización observada: cociente entre tiempo efectivo y ventana operativa.

La distinción permite identificar si una pérdida de producción se origina en una velocidad insuficiente de ejecución o en una alimentación intermitente del recurso. Un sistema puede presentar un ritmo elevado durante los períodos activos y, simultáneamente, un bajo rendimiento diario si permanece inactivo durante una parte relevante de su ventana de operación.

Para separar trabajo continuo e interrupciones se define un umbral a partir de la distribución empírica de los intervalos entre confirmaciones. En el Capítulo 5 se utiliza un umbral de 300 segundos, respaldado por la concentración observada de los registros bajo dicho valor. Esta decisión se fundamenta en los datos y no en una duración de jornada teórica.

2.11 Validación ex-post del procedimiento de dimensionamiento

La verificación y la validación responden a preguntas distintas. La primera comprueba que un procedimiento o modelo haya sido implementado conforme a su formulación; la segunda examina si representa adecuadamente el sistema real para el propósito que se le asigna. Esta distinción, ampliamente utilizada en modelación y simulación, resulta también útil para evaluar un procedimiento de dimensionamiento (Sargent, 2013).

En el presente caso, la implementación de la solución durante el desarrollo de la tesina permite efectuar un contraste ex-post que normalmente no está disponible en una evaluación previa. El análisis se estructura en tres niveles: parámetros de demanda,

parámetros de desempeño y configuración resultante. Examinar los tres niveles evita concluir que un procedimiento es válido únicamente porque el resultado final coincide, ya que esa coincidencia podría provenir de desviaciones de signo opuesto que se compensan.

Esta lógica orienta el Capítulo 5: primero se contrasta si la composición de la demanda histórica se mantuvo; luego se comparan los tiempos y ritmos supuestos con los observados; y finalmente se evalúa si el número de estaciones y posiciones resultó suficiente frente a la operación real.

2.12 Evaluación Económica del Proyecto

2.12.1 Flujo Incremental e Indicadores

La evaluación económica de una intervención sobre un proceso existente debe construirse sobre flujos incrementales: se incorporan únicamente los costos y beneficios que cambian entre la situación con proyecto y el escenario sin proyecto. Los costos comunes a ambos escenarios no afectan la decisión y no deben incorporarse como beneficios o egresos atribuibles a la inversión (Sapag Chain et al., 2014).

El criterio principal utilizado es el Valor Actual Neto (VAN):

$$VAN = -I_0 + \sum [FC_t / (1 + r)^t] \quad (2.5)$$

donde I_0 corresponde a la inversión inicial, FC_t al flujo incremental del período t y r a la tasa de descuento. Un VAN positivo indica que el proyecto genera valor por sobre la rentabilidad exigida. Como indicadores complementarios se emplean la Tasa Interna de Retorno (TIR), definida como la tasa que hace $VAN = 0$, y el período de recuperación descontado.

La definición del escenario sin proyecto es especialmente relevante en este caso. Si el crecimiento de la demanda obliga a incorporar recursos aun sin implementar el PTL,

dichos recursos forman parte del contrafactual y el beneficio del proyecto debe evaluarse respecto de ese futuro sin inversión, no respecto de una fotografía estática de la operación actual.

2.12.2 Tratamiento de la Incertidumbre

Los parámetros económicos están sujetos a incertidumbre y, por tanto, la conveniencia del proyecto no debe evaluarse únicamente sobre un caso puntual. En coherencia con el Capítulo 6 se emplean tres herramientas: análisis de sensibilidad univariante, análisis de escenarios y análisis de valor umbral (Sapag Chain et al., 2014).

La sensibilidad univariante modifica un parámetro manteniendo los demás constantes y permite identificar aquellos a los que el VAN responde con mayor intensidad. El análisis de escenarios combina supuestos coherentes en configuraciones pesimista, base y optimista. El análisis de valor umbral invierte la evaluación y determina el valor que debe alcanzar un parámetro para que el VAN sea igual a cero, lo que resulta especialmente útil cuando no existe un registro propio confiable para dicho parámetro.

No se incorpora simulación de Monte Carlo al marco aplicado, dado que el capítulo económico no utiliza esta técnica. La simplificación permite mantener correspondencia directa entre las herramientas teóricas expuestas y las efectivamente empleadas.

2.13 Criterios Ergonómicos para el Diseño de la Estación

La configuración física de una estación de clasificación condiciona tanto el tiempo de ejecución como la exposición del operario a posturas y movimientos repetitivos. El diseño debe ubicar los elementos de mayor frecuencia dentro de las zonas de alcance más favorables y reservar posiciones menos accesibles para manipulaciones ocasionales (Freivalds & Niebel, 2014).

Para trabajo de pie con manipulación de objetos livianos, la altura del plano de trabajo se define en relación con la altura del codo y con la exigencia de precisión de la tarea. De manera análoga, la extensión vertical y horizontal de las posiciones debe limitar movimientos repetidos de tronco y elevaciones innecesarias de hombro. Estos principios se aplican en el Capítulo 4 para decidir la altura del mesón, la ubicación de las posiciones con indicador y la disposición de los buffers.

En el contexto chileno, el diseño debe considerar las exigencias asociadas al manejo manual de cargas y a los factores de riesgo musculoesquelético. La Ley N.º 20.949 modificó el Código del Trabajo en materia de manipulación manual de cargas, mientras que el Ministerio de Salud mantiene un protocolo actualizado de vigilancia de trabajadores expuestos a factores de riesgo de trastornos musculoesqueléticos relacionados con el trabajo (Ley N.º 20.949, 2016; Ministerio de Salud de Chile, 2024).

2.14 Síntesis y correspondencia con los capítulos de aplicación

La Tabla 2.3 resume la función que cumple cada herramienta dentro de la tesina. Esta correspondencia permite mantener el marco teórico acotado a conceptos que posteriormente se utilizan de forma explícita.

Tabla 2.3: Síntesis de las herramientas del marco teórico y su correspondencia con los capítulos de aplicación.

Herramienta	Decisión o medición que fundamenta	Aplicación principal
Capacidad, utilización y restricción	Identificar dónde una intervención puede modificar el throughput y definir holgura de diseño	Capítulos 3 y 4
Ley de Little	Dimensionar y contrastar la ocupación de posiciones de clasificación	Capítulos 4 y 5
Estudio del trabajo	Construir el modelo de tiempos del proceso	Capítulos 3 y 4
Registros transaccionales	Separar ritmo efectivo, interrupciones y utilización observada	Capítulo 5
Validación ex-post	Contrastar demanda, desempeño y configuración resultante	Capítulo 5
Evaluación incremental	Determinar VAN, TIR y payback del proyecto	Capítulo 6

Sensibilidad, escenarios y umbrales	Evaluar robustez económica frente a incertidumbre	Capítulo 6
Puntuación multicriterio	Comparar alternativas tecnológicas heterogéneas	Capítulo 7
Criterios ergonómicos	Configurar físicamente la estación de clasificación	Capítulo 4

Fuente: Elaboración propia.

3 Diagnóstico de la operación actual

El presente capítulo caracteriza el proceso actual de preparación de pedidos del canal de comercio electrónico, establece una línea base cuantitativa y determina las brechas que justifican la intervención propuesta. El diagnóstico se concentra en los elementos que posteriormente alimentan el dimensionamiento y la evaluación: estructura de la demanda, estacionalidad, recursos, flujo de trabajo, desempeño observado y restricciones del método actual.

Los volúmenes presentados provienen de registros reales de doce meses y se muestran anonimizados mediante el factor de escala definido en el Capítulo 1. La transformación modifica las magnitudes absolutas reportadas, pero conserva la estructura y las relaciones internas utilizadas en el análisis. La evaluación económica posterior se realiza sobre la escala real de la operación.

3.1 Caracterización de la Demanda

3.1.1 Volumen y Estructura

La base anual anonimizada comprende 209.930 órdenes, 286.164 líneas y 338.854 unidades. Para interpretar correctamente la carga de trabajo es necesario distinguir entre el promedio por día calendario y el promedio por día operativo, ya que la instalación no trabaja todos los días del año. Bajo la estimación actual de 264 días operativos, la carga media corresponde a 795 órdenes, 1.084 líneas y 1.284 unidades por jornada. La Tabla 3.1 detalla estos valores para el período analizado.

Tabla 3.1: Caracterización de la demanda.

Indicador	Total del período reportado	Promedio por día calendario	Promedio por día operativo
Órdenes	209.930	575	795
Líneas	286.164	784	1.084
Unidades	338.854	928	1.284

Fuente: Elaboración propia a partir de los registros transaccionales anonimizados del período.

La estructura de la demanda presenta 1,36 líneas por orden y 1,18 unidades por línea. Esto confirma un perfil de baja profundidad de pedido, condición relevante porque una fracción importante del trabajo de clasificación se concentra en pedidos pequeños, mientras una porción menor de órdenes reúne una parte significativa de las unidades.

3.1.2 Composición Según Número de Referencias

La composición mono-SKU/multi-SKU debe distinguirse según la unidad de medición. En términos de órdenes, el 25,2 % contiene dos o más referencias; sin embargo, esas órdenes concentran el 45,1 % de las líneas y el 45,8 % de las unidades. Por tanto, una cuarta parte de los pedidos explica casi la mitad del volumen físico que debe ser clasificado y consolidado.

La Tabla 3.2 presenta esta participación según el nivel de medición considerado.

Tabla 3.2: Participación mono-SKU y multi-SKU según nivel de medición.

Nivel de medición	Total	Mono-SKU	Multi-SKU	% multi-SKU
Órdenes	209.930	156.990	52.940	25,2 %
Líneas	286.164	156.990	129.174	45,1 %
Unidades	338.854	183.794	155.060	45,8 %

Fuente: Elaboración propia a partir de los registros transaccionales anonimizados del período.

La Figura 3.1 representa gráficamente la diferencia de participación multi-SKU entre los tres niveles de medición.

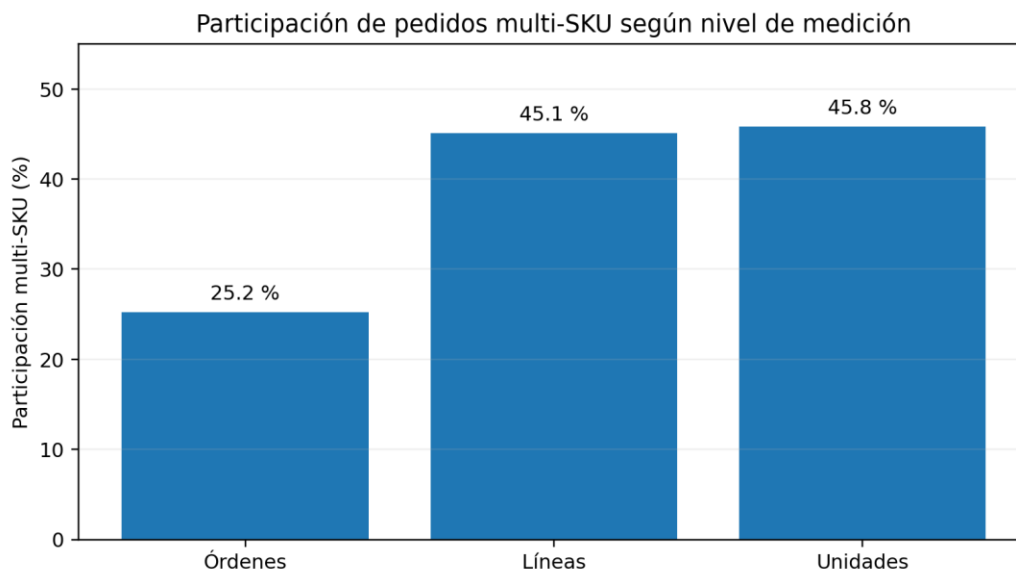


Figura 3.1: Participación multi-SKU según nivel de medición.

Fuente: Elaboración propia a partir de los registros transaccionales anonimizados del período.

Las órdenes multi-SKU contienen en promedio 2,44 líneas y 2,93 unidades. Las mono-SKU contienen 1,17 unidades en promedio. Esta última cifra es relevante porque un pedido mono-SKU puede contener más de una unidad de la misma referencia y, por tanto, requerir una posición de consolidación aun cuando posea una sola referencia.

3.1.3 Estacionalidad y Comportamiento en Campaña

La demanda presenta una concentración extrema en eventos comerciales. El máximo observado del período alcanza 9.590 órdenes, 12.957 líneas y 15.997 unidades en una jornada, equivalente a 12,1 veces el promedio de un día operativo. La magnitud del máximo no se traduce en un incremento proporcional de la producción diaria: durante el último evento, la evacuación completa de la demanda requirió seis días operativos.

Bajo la configuración reforzada de campaña se incorporó personal adicional, se extendió la jornada aproximadamente dos horas diarias y se operaron dos sábados consecutivos. El ritmo procesado alcanzó aproximadamente 1.598 órdenes por día, cerca del doble de la producción de una jornada ordinaria, pero todavía muy por debajo del máximo de ingreso. La manifestación operacional del peak es, por tanto, el diferimiento del trabajo hacia jornadas posteriores.

Esta diferencia entre demanda ingresada y demanda procesada constituye el principal problema de capacidad de respuesta que debe resolver el diseño posterior. Para efectos de dimensionamiento se mantienen separadas tres magnitudes: demanda ordinaria, demanda efectivamente procesada en campaña y máximo diario de ingreso.

3.1.4 Canales y ventanas de despacho

La operación atiende distintos orígenes de pedido y transportistas con ventanas de corte diferenciadas. Estas ventanas condicionan la secuencia de preparación y obligan a mantener la identificación documental de cada pedido hasta su despacho. La Tabla 3.3 resume la configuración actualmente levantada.

Tabla 3.3: Canales, participación y ventanas de corte de despacho.

Canal / origen	Participación	Órdenes/día	Hora de despacho	Condición de corte
Mercado Libre	34 %	270	14:00	Ingreso continuo; lo recibido antes de las 12:00 debe despacharse el mismo día
Canal propio	38 %	302	15:00	Órdenes ingresadas hasta las 16:00 del día anterior
Gran retail	28 %	223	16:00	Órdenes ingresadas hasta las 23:59 del día anterior
Despacho domiciliario	Transversal	—	17:00	Órdenes ingresadas hasta las 23:59 del día anterior

Fuente: Elaboración propia a partir del levantamiento de la operación.

De acuerdo con el levantamiento disponible, la mayor parte de la carga de la jornada es conocida antes del inicio del turno; el principal ingreso intradía corresponde al canal de

marketplace. Esta condición favorece la conformación anticipada de grupos de preparación y reduce la necesidad de reagrupar continuamente durante la jornada.

3.2 Infraestructura, Recursos y Sistemas de Apoyo

3.2.1 Estructura de Almacenamiento y Traslado Vertical

El inventario del canal se almacena en una estructura de entrepiso de tres niveles. Cada nivel dispone de 15 pasillos y 15 bahías por pasillo; el ancho de pasillo y de bahía es de aproximadamente 1,2 m y la altura entre pisos de 2,6 m. Estas dimensiones son relevantes porque condicionan el recorrido, el tamaño de los carros y el desplazamiento vertical del flujo.

El traslado de carros entre niveles se realiza mediante un montacargas de carga único, que no admite personas. El operario se desplaza por escalera mientras el carro utiliza el equipo, cuyo ciclo completo se estima en al menos cinco minutos. En la práctica, esta condición incentiva estrategias para evitar el traslado vertical del carro, especialmente cuando las referencias requeridas en un nivel son pocas.

3.2.2 Recursos Humanos y Jornada

En régimen ordinario la operación dispone de cuatro operarios de recolección y cuatro operarios en estación para clasificación, etiquetado y empaque, bajo coordinación de una supervisora. Durante campañas se incorpora dotación adicional y se extiende la jornada, separando funciones para sostener un mayor throughput.

Para los cálculos del diagnóstico y del diseño se adopta una jornada efectiva de 6 h 40 min en operación ordinaria y de 8 h 40 min en campaña. Estas cifras representan tiempo disponible de modelación una vez descontadas pausas y pérdidas previstas; no deben confundirse con una medición directa del tiempo productivo real, que posteriormente se

estima de forma distinta a partir de los registros transaccionales del sistema implementado.

3.2.3 Sistemas de Información y Soportes

La operación utiliza un sistema de gestión empresarial para administrar inventario, generar órdenes de preparación y emitir documentación, complementado por un sistema de etiquetado y por terminales de radiofrecuencia para ejecutar la recolección. La conformación de los grupos de preparación se realiza fuera de estos sistemas, mediante una planilla de cálculo administrada por la supervisora.

El diagnóstico tecnológico no identifica una ausencia total de digitalización: la brecha se concentra en la orquestación del trabajo y en la clasificación posterior al picking. Esta precisión es importante porque la solución propuesta se integra sobre sistemas existentes, en lugar de reemplazarlos por completo.

3.3 Proceso Actual de Preparación de Pedidos (AS-IS)

El proceso se inicia con las órdenes disponibles en el sistema de gestión. La supervisora conforma manualmente los grupos de preparación mediante planilla de cálculo y prioriza los pedidos según canal y ventana de despacho. Esta actividad requiere aproximadamente entre veinte y treinta minutos al inicio de la jornada y depende del criterio de una persona.

La conformación vigente incorpora compatibilidad de destino, pero no optimización sistemática por proximidad entre ubicaciones. Evaluar manualmente dicha proximidad sobre el conjunto diario de órdenes no resulta practicable, por lo que la asignación busca principalmente cumplir las ventanas de despacho y distribuir la carga.

3.3.1 Recolección por Lote

Cada operario recibe un carro asociado a un grupo de aproximadamente cuarenta órdenes y ejecuta la recolección con apoyo de radiofrecuencia. En una jornada ordinaria se procesan del orden de veinte carros. Dado que las referencias de un mismo grupo pueden distribuirse entre los tres niveles, el flujo enfrenta la restricción física del traslado vertical descrita anteriormente.

Para evitar esperas del montacargas, los operarios pueden recoger manualmente referencias puntuales en niveles superiores o fraccionar la recolección por piso, utilizando carros distintos. Esta práctica reduce el uso del equipo vertical, pero provoca que referencias pertenecientes a una misma orden multi-SKU lleguen a la estación separadas en tiempo y contenedor.

3.3.2 Clasificación, Emisión documental y Empaque

Los carros llegan a la zona de estaciones, donde su contenido debe transformarse desde un flujo organizado por lote en un flujo organizado por pedido. Los pedidos mono-SKU presentan una clasificación directa; los multi-SKU exigen identificar y reunir las distintas referencias, tarea que actualmente se ejecuta sin guiado luminoso ni confirmación positiva de la posición de destino.

La emisión de factura y etiqueta se encuentra además condicionada al cierre completo del grupo de preparación. En consecuencia, un pedido físicamente completo no avanza necesariamente al empaque: debe esperar a que se resuelvan los demás pedidos de su grupo. El proceso queda así acoplado al pedido más lento del lote.

Una vez emitida la documentación, los pedidos avanzan a empaque y luego a la zona de consolidación del transportista correspondiente. La Figura 3.2 representa el flujo actual (AS-IS) y sitúa los principales puntos críticos identificados.

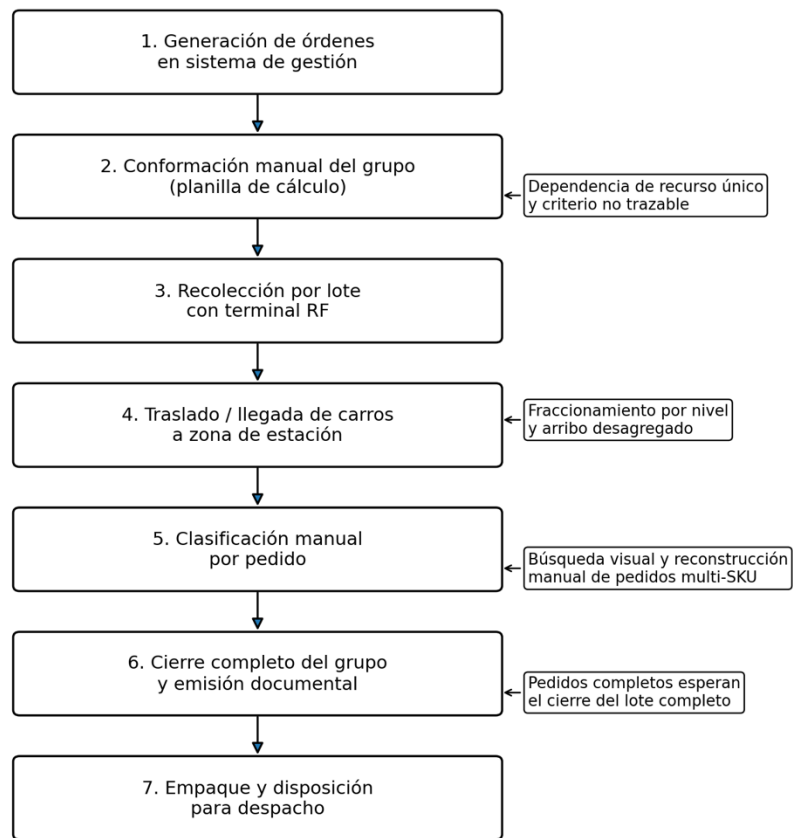


Figura 3.2: Flujo actual (AS-IS) y principales puntos críticos.
Fuente: Elaboración propia a partir del levantamiento de la operación.

3.4 Línea Base de Desempeño

La línea base reúne únicamente los indicadores que se utilizan posteriormente para dimensionar o evaluar la solución. Se distingue entre valores provenientes de registros, valores calculados a partir de dichos registros y estimaciones declaradas por la operación. La Tabla 3.4 reúne la línea base de desempeño con esa distinción.

Tabla 3.4: Línea base de desempeño.

Indicador	Régimen ordinario	Campaña / máximo	Tipo de dato
Órdenes procesadas por día	795	1.598	Registro / cálculo sobre días operativos
Líneas por día	1.084	12.957 en máximo de ingreso	Registro anonimizado
Unidades por día	1.284	15.997 en máximo de ingreso	Registro anonimizado
Órdenes por carro	≈ 40	—	Configuración operacional
Carros por día	≈ 20	≈ 40	Estimación operacional
Productividad agregada de recolección	48,1 unid/h-h; 40,6 líneas/h-h	—	Indicador derivado de volumen, dotación y jornada efectiva
Evacuación de campaña	—	6 días operativos	Observación operacional
Error de despacho	2 %–3 %	hasta 4 %	Estimación de la operación

Fuente: Elaboración propia a partir de registros anonimizados y levantamiento operacional.

La relación entre aproximadamente veinte carros diarios y cuarenta órdenes por carro produce una referencia nominal cercana a 800 órdenes por jornada. Dicha cifra es prácticamente coincidente con las 795 órdenes procesadas en promedio, pero esta coincidencia no demuestra por sí sola que 800 órdenes/día constituyan la capacidad máxima del sistema. Puede representar simplemente la configuración utilizada para atender la demanda observada.

La tasa de error entre 2 % y 3 %, y su incremento hasta aproximadamente 4 % en campaña, corresponde a una estimación de la operación y no a un registro sistemático por causa. Por ello sirve como parámetro de línea base y de sensibilidad económica, pero no permite atribuir cuantitativamente todos los errores a la clasificación manual.

3.5 Análisis de Restricciones y Causas Operacionales

Levantamiento: Los hallazgos de esta sección provienen de la triangulación de las fuentes descritas en el Capítulo 1, específicamente: el levantamiento del proceso mediante entrevistas semiestructuradas con jefatura, supervisión y personal operativo; la

observación directa del flujo en terreno, tanto en régimen ordinario como en campaña; y los registros transaccionales de doce meses previos a la implementación. Las entrevistas y la observación documentaron las reglas de trabajo efectivamente aplicadas, incluidas aquellas no formalizadas en el sistema de gestión, mientras que los registros permitieron verificar si el comportamiento declarado se reflejaba en el volumen, la composición y los tiempos observados.

Análisis: El análisis se estructuró como una cadena causal: para cada restricción se identificó el evento que la origina, el comportamiento que la operación adopta frente a ella y el efecto que ese comportamiento traslada aguas abajo. Este encadenamiento permite distinguir una limitación de capacidad propiamente tal de un comportamiento inducido por la forma de operar, distinción determinante para definir el tipo de intervención requerida.

Interpretación: La interpretación mantiene explícita la calidad de la evidencia que respalda cada afirmación. Los hallazgos sustentados en registros se presentan como tales; los que provienen de observación y entrevista se identifican como prácticas documentadas en el levantamiento; y las relaciones causales que no admiten cuantificación con los datos disponibles se enuncian como explicaciones plausibles y no como atribuciones demostradas. Esta distinción explica por qué la sección prioriza las intervenciones según factibilidad e impacto y no según una asignación cuantitativa de la brecha total de capacidad.

El montacargas no se comporta necesariamente como un cuello de botella directo, porque los operarios han desarrollado mecanismos para evitar su uso. Sin embargo, esos mecanismos trasladan el problema aguas abajo: la recolección fraccionada por nivel provoca que las referencias de una misma orden lleguen a clasificación en momentos y contenedores diferentes.

La estación debe entonces reconstruir manualmente la composición del pedido. Esta actividad incrementa búsqueda, manipulación y carga cognitiva, y constituye una fuente plausible de errores de clasificación. La relación causal identificada es: restricción del

traslado vertical → fraccionamiento de la recolección → arribo desagregado → reconstrucción manual.

3.5.1 Acoplamiento entre cierre de grupo y emisión documental

La emisión de documentación al cierre del grupo acopla pedidos independientes. Una orden simple puede estar físicamente completa y, aun así, permanecer detenida hasta que se cierre el pedido más lento del conjunto. La unidad de avance efectiva deja de ser el pedido y pasa a ser el grupo completo.

Esta regla genera trabajo en curso y extiende el tiempo de permanencia de pedidos que no presentan ninguna dificultad propia. Su modificación constituye una intervención de lógica de proceso y sistemas, no una ampliación de infraestructura.

3.5.2 Dependencia de la Conformación Manual

La generación de grupos depende de una planilla administrada por la supervisora. Además de consumir tiempo, la actividad carece de trazabilidad formal del criterio aplicado y no escala de manera natural ante un aumento importante del volumen. Su efecto principal es la dependencia de un recurso único y la imposibilidad de automatizar criterios de asignación sobre un conjunto grande de pedidos.

3.5.3 Comportamiento Combinado Durante Campaña

Durante campaña las brechas se refuerzan entre sí: aumenta el número de carros, se intensifica la necesidad de coordinar el flujo entre niveles y estaciones, crece la cantidad de pedidos simultáneamente abiertos y se eleva la presión temporal sobre la clasificación manual. El resultado observado es el diferimiento del procesamiento durante varios días, acompañado de mayor dotación y extensión de jornada.

El diagnóstico no permite afirmar que una única actividad explique toda la brecha de capacidad. Sí permite identificar que el proceso de clasificación y la lógica de cierre por grupo son las intervenciones de mayor factibilidad e impacto, porque concentran espera, manipulación y falta de trazabilidad sin requerir modificar la infraestructura de almacenamiento.

3.6 Brechas Identificadas y Priorización

Para ordenar las oportunidades se utiliza una priorización cualitativa basada en dos dimensiones: impacto operacional y factibilidad de intervención. Se considera impacto alto cuando la brecha afecta directamente exactitud, cumplimiento de despacho o continuidad del flujo; impacto medio cuando afecta principalmente eficiencia o dependencia de recursos. La factibilidad es alta cuando la brecha puede abordarse mediante lógica de sistemas o método de trabajo sin modificar la infraestructura principal; media cuando requiere cambios operacionales adicionales; y baja cuando depende de reemplazo o ampliación de equipamiento estructural. La Tabla 3.5 presenta las brechas identificadas y su priorización según estos criterios.

Tabla 3.5: Brechas identificadas y priorización.

N°	Brecha	Manifestación	Impacto	Factibilidad	Prioridad
1	Emisión documental condicionada al cierre del grupo	Pedidos completos permanecen en espera	Alto	Alta	1
2	Clasificación manual sin asistencia ni verificación positiva	Búsqueda, reconstrucción y error potencial	Alto	Alta	1
3	Fragmentación de la recolección por nivel	Arribo desagregado de referencias de una misma orden	Alto	Media	2
4	Conformación manual de grupos	Dependencia de recurso único y criterio no trazable	Medio	Alta	2
5	Ausencia de trazabilidad de la clasificación	No existe medición sistemática del origen de incidencias	Medio	Alta	2
6	Ciclo y disponibilidad del montacargas	Esperas y prácticas de evitación	Medio	Baja	3

Fuente: Elaboración propia a partir del diagnóstico.

3.7 Requerimientos Derivados para la Solución

- A partir de las brechas priorizadas, la solución objetivo debe cumplir los siguientes requerimientos funcionales:
- Desacoplar el cierre de cada pedido del cierre del grupo, permitiendo activar la emisión documental cuando el pedido individual se encuentre completo.
- Asistir la clasificación mediante indicación visual del destino y confirmación positiva de la depositación, reduciendo la búsqueda y la dependencia de memoria del operario.
- Mantener una asignación persistente por pedido que admita la llegada fraccionada de referencias sin exigir que todas provengan del mismo carro o nivel.
- Automatizar la conformación y transmisión de los grupos de preparación, eliminando la dependencia de una planilla y de un recurso único.
- Registrar transaccionalmente las confirmaciones de clasificación para generar trazabilidad y habilitar mediciones posteriores de desempeño y calidad.
- Permitir crecimiento modular de capacidad para responder a campañas sin dimensionar toda la operación permanente sobre el máximo anual.

Estos requerimientos constituyen las entradas de diseño desarrolladas en el Capítulo 4. En conjunto, responden a las brechas de mayor impacto y factibilidad identificadas en el diagnóstico: clasificación manual, cierre documental por grupo, llegada fraccionada de referencias y dependencia de la conformación manual. La propuesta no busca eliminar la recolección por lotes ni rediseñar la estructura de almacenamiento; concentra la intervención en la orquestación del grupo, la clasificación posterior y el desacoplamiento documental.

4 Diseño de la propuesta

El presente capítulo desarrolla el diseño de la solución objetivo basada en un sistema Put to Light (PTL) para la etapa de clasificación y consolidación. El diseño toma como entrada las brechas identificadas en el diagnóstico y define la arquitectura funcional, las reglas de operación, el dimensionamiento de estaciones y posiciones, y los criterios físicos del puesto de trabajo. La propuesta mantiene la política de recolección por lotes y la infraestructura de almacenamiento; la intervención se concentra en la transformación del flujo por producto en flujo por pedido.

El dimensionamiento se formula como una evaluación ex-ante. Su contraste con el comportamiento observado después de la implementación se desarrolla en el Capítulo 5, sin modificar retrospectivamente los supuestos utilizados en esta etapa.

4.1 Enfoque general y criterios de diseño

Cuatro criterios orientan la solución propuesta:

Desacoplamiento del avance individual del pedido. Cada pedido debe generar su documentación y avanzar al empaque cuando queda completo, sin esperar el cierre del resto del lote.

Absorción de la llegada fraccionada. La solución debe admitir que las referencias de un mismo pedido lleguen en carros y momentos distintos, manteniendo una asignación persistente de destino.

Sustitución de la identificación manual por guiado. El destino de cada unidad debe ser determinado por el sistema y comunicado mediante señal luminosa, con confirmación positiva de la depositación.

Escalabilidad modular. La capacidad debe poder activarse de manera diferenciada entre régimen ordinario y períodos de alta demanda, evitando que toda la instalación opere permanentemente al nivel requerido por el máximo histórico.

4.2 Arquitectura Funcional de la Solución

La solución se estructura en tres componentes funcionales:

- Desarrollo sobre el sistema de gestión: genera el grupo de preparación asociado al carro y activa la integración con el sistema PTL. Su objetivo es reemplazar la conformación manual mediante planilla y eliminar la dependencia de un recurso único.
- Software de administración PTL: recibe los grupos, asigna pedidos a posiciones, gobierna los indicadores luminosos, registra confirmaciones, detecta el cierre de cada pedido y administra excepciones.
- Equipamiento de estación: mueble de clasificación, módulos luminosos, controladores, lector de códigos, impresora y posiciones de buffer para desacoplar clasificación y empaque.

La Figura 4.1 representa la arquitectura funcional simplificada de la solución.

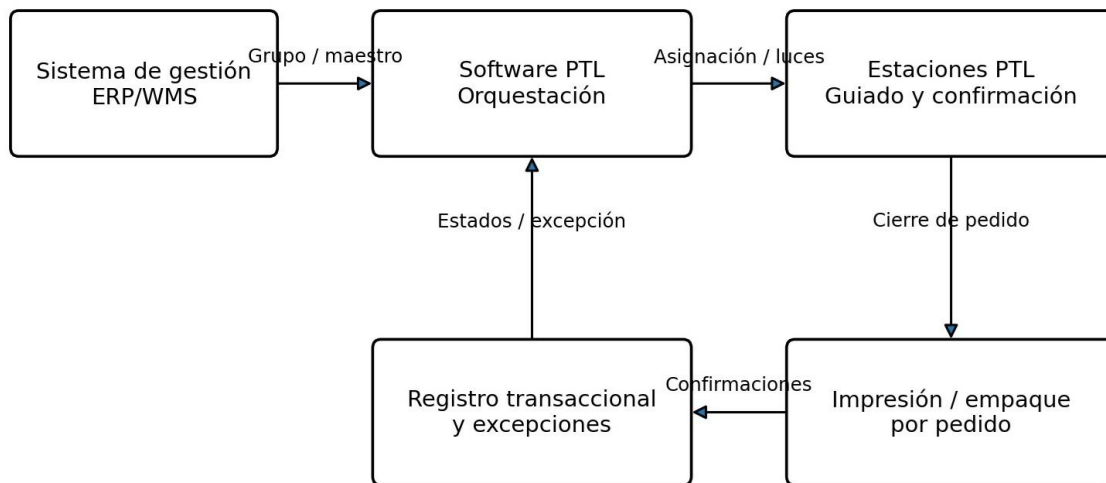


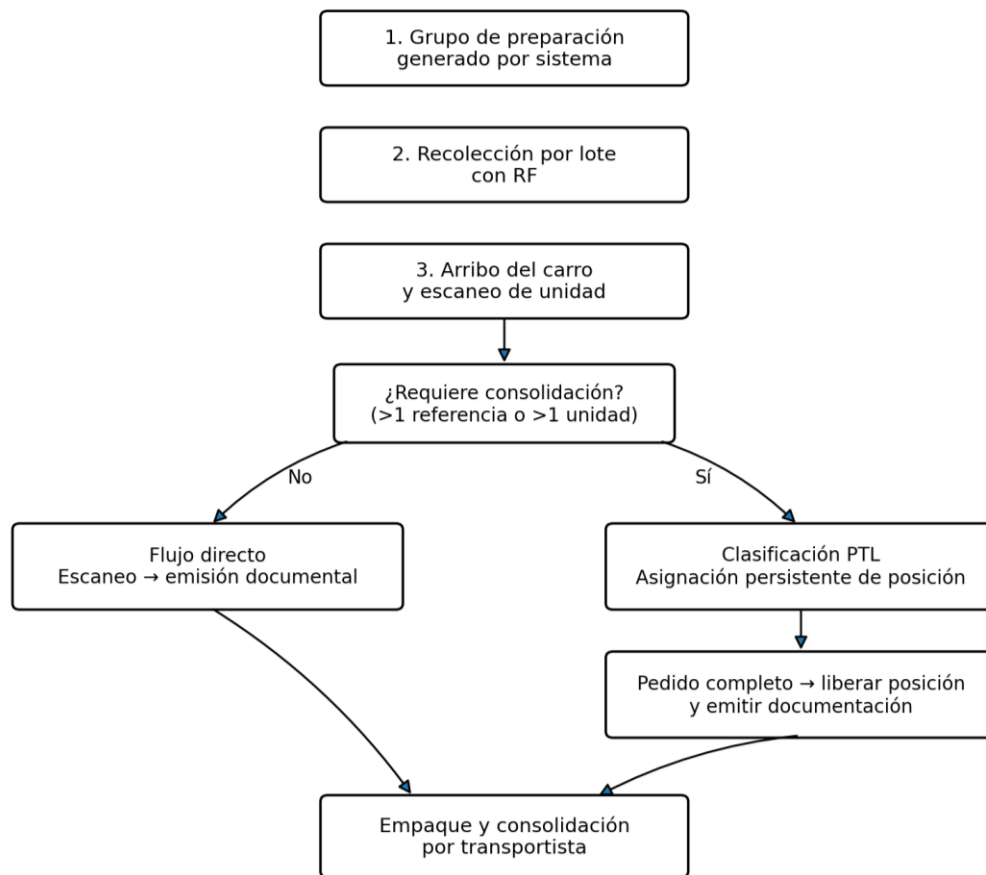
Figura 4.1: Arquitectura funcional simplificada de la solución PTL.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.1 Flujo Operativo Objetivo (TO-BE)

El grupo de preparación se genera en el sistema de gestión y se transmite al sistema PTL. El operario ejecuta la recolección por lote y traslada el carro a la estación asignada. A partir del escaneo de cada unidad, el sistema aplica un tratamiento según la composición del pedido.

Los pedidos de una referencia y una unidad siguen un flujo directo: se escanean, activan la emisión documental y avanzan al empaque sin ocupar una posición de clasificación. Los pedidos de más de una referencia o de más de una unidad ocupan una posición PTL. El sistema mantiene dicha posición hasta completar el pedido, incluso cuando sus referencias arriban en carros diferentes. Al completarse, la posición se libera y se genera la documentación correspondiente.

El cambio central respecto del escenario actual es que la unidad de avance vuelve a ser el pedido individual: la documentación se activa por completitud del pedido y no por cierre del grupo completo. La Figura 4.2 representa el flujo operativo objetivo (TO-BE).



Cambio clave: el pedido avanza por su propio estado, no por el cierre completo del lote.

Figura 4.2: Flujo operativo objetivo (TO-BE).

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Integración Funcional

La integración se especifica a nivel funcional, suficiente para delimitar el alcance del proyecto y sus partidas de costo. La definición técnica de interfaces, protocolos y desarrollo detallado permanece fuera del alcance de la tesina. La Tabla 4.1 especifica el intercambio de información entre el sistema de gestión y el sistema PTL.

Tabla 4.1: Intercambio de información entre el sistema de gestión y el sistema PTL.

Sentido	Mensaje	Contenido principal	Momento
Entrada	Grupo de preparación	Grupo/carro, pedidos, referencias, cantidades y canal	Al conformarse el grupo
Entrada	Maestro de materiales	Referencia, código de barras y datos requeridos por el PTL	Actualización periódica
Salida	Cierre de pedido	Identificador y confirmación de completitud	Al completar el pedido
Entrada	Documentación	Etiqueta y/o factura correspondiente	En respuesta al cierre
Salida	Excepción	Referencia inesperada, discrepancia o cancelación	Al detectarse

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Reglas de Operación

4.3.1 Tratamientos Según Composición del Pedido

Todos los pedidos transitan por la estación, pero solo aquellos que requieren consolidación ocupan una posición del mueble PTL. Esta distinción separa dos problemas de dimensionamiento: la capacidad de procesamiento de la estación depende del total de líneas/unidades que deben ser escaneadas, mientras el número de posiciones depende del inventario simultáneo de pedidos incompletos. La Tabla 4.2 resume el tratamiento operativo que recibe cada pedido según su composición.

Tabla 4.2: Tratamiento operativo según composición del pedido.

Composición	Proporción de trabajo	Órdenes/día reportadas	Tratamiento
1 referencia, 1 unidad	≈ 62 %	≈ 493	Flujo directo: escaneo, documentación y empaque
1 referencia, ≥ 2 unidades	≈ 13 %	≈ 102	Ocupa posición hasta completar cantidad
≥ 2 referencias	25,2 %	≈ 200	Ocupa posición hasta completar referencias
Total que ocupa posición	≈ 38 %	≈ 302	Base actual de dimensionamiento de posiciones

Fuente: Elaboración propia a partir de la caracterización anonimizada de la demanda.

4.3.2 Asignación de Estaciones y Posiciones

Cada pedido que requiere consolidación conserva una estación y una posición lógica hasta quedar completo. Esta persistencia permite absorber la llegada fraccionada de referencias sin exigir que un pedido viaje íntegramente en un mismo carro.

La operación puede agrupar estaciones por canal de venta para simplificar materiales, etiquetas y ventanas de despacho. La asignación de las estaciones de capacidad adicional debe mantenerse flexible durante campañas, de modo de absorber desbalances entre canales. La posición específica dentro de cada estación se asigna priorizando las zonas de mejor alcance y visibilidad.

4.3.3 Gestión de Excepciones y Buffer

El buffer cumple dos funciones: recibir pedidos ya completos en espera de traslado al empaque y absorber temporalmente unidades cuando las posiciones con indicador se encuentran ocupadas. Este mecanismo evita que una saturación puntual detenga el flujo, aunque introduce manipulación adicional y, por tanto, debe considerarse una condición de degradación y no el modo normal de operación.

En consecuencia, el número de posiciones con indicador debe ser suficiente para que el uso del buffer por saturación sea excepcional. El Capítulo 5 permite posteriormente contrastar si esta condición se cumple en la operación observada.

4.4 Dimensionamiento

4.4.1 Parámetros de Diseño

La Tabla 4.3 presenta los parámetros de diseños utilizados en el dimensionamiento de la solución.

Tabla 4.3: Parámetros de diseño utilizados en el dimensionamiento.

Parámetro	Valor utilizado	Origen / tratamiento
Órdenes por día operativo	795	Diagnóstico; volumen anonimizado
Líneas por día operativo	1.084	Diagnóstico; volumen anonimizado
Demanda procesada en campaña	1.598 órdenes/día	Diagnóstico
Máximo histórico de ingreso	9.590 órdenes / 12.957 líneas	Diagnóstico; condición de estrés de diseño
Pedidos que ocupan posición	≈ 38 %	Estimación derivada de la composición del pedido
Jornada efectiva ordinaria	6 h 40 min	Diagnóstico
Jornada efectiva de campaña	8 h 40 min	Jornada extendida
Utilización objetivo	0,85	Criterio de diseño; sujeto a sensibilidad
Factor de seguridad de posiciones	1,8	Margen sobre ocupación media; criterio de diseño

Fuente: Elaboración propia.

La utilización objetivo se emplea como margen de capacidad para evitar dimensionar al 100 % de uso, coherente con el efecto conjunto de utilización y variabilidad descrito en el marco teórico (Hopp & Spearman, 2008).

4.4.2 Número de Estaciones: Capacidad de Procesamiento

El número de estaciones se determina dividiendo la carga de trabajo diaria de la etapa de clasificación por la jornada efectiva disponible y por la utilización objetivo:

$$N = C / (J \cdot u) \quad (4.1)$$

donde C corresponde a la carga de trabajo en horas-estación, J a la jornada efectiva y u a la utilización objetivo. La carga de trabajo proviene del estudio de tiempos del proyecto y

se aplica sobre los volúmenes correspondientes a cada condición de demanda. La Tabla 4.4 presenta el número de estaciones requerido para cada condición.

Tabla 4.4: Número de estaciones requerido según condición de demanda.

Condición	Líneas/día	Carga de trabajo	Jornada efectiva	Estaciones requeridas
Día promedio	1.084	4,86 h	6,67 h	0,9
Campaña: volumen procesado	2.173	9,74 h	8,67 h	1,3
Máximo histórico de ingreso	12.957	58,06 h	8,67 h	7,9

Fuente: Elaboración propia; cálculo con $u = 0,85$.

Para la capacidad física máxima de la solución se adopta el mayor ingreso diario observado como condición de estrés. Bajo ese supuesto, el requerimiento de 7,9 estaciones se redondea a ocho. Esta elección no significa que las ocho estaciones deban operar permanentemente; define la capacidad instalada necesaria para evitar que un evento de intensidad equivalente al máximo histórico deba diferirse por restricción de la etapa PTL.

El redondeo a ocho estaciones establece que esa configuración es suficiente, pero no que sea la mínima necesaria. Para verificarlo se evalúan configuraciones alternativas bajo la misma condición de estrés, manteniendo la carga de trabajo, la jornada efectiva y la utilización objetivo definidas en la Tabla 4.3. La Tabla 4.5 presenta el resultado de esa evaluación.

Tabla 4.5: Contraste de configuraciones alternativas de estaciones bajo la condición de máximo histórico de ingreso.

Estaciones (N)	Capacidad útil a $u = 0,85$	Holgura frente a la carga	Utilización requerida (ρ)	¿Cumple $\rho \leq 0,85$?
6	44,22 h	- 13,84 h	1,116	No
7	51,59 h	- 6,47 h	0,957	No
8	58,96 h	+ 0,90 h	0,837	Sí
9	66,33 h	+ 8,27 h	0,744	Sí, con capacidad ociosa

Fuente: Elaboración propia sobre una carga de 58,06 horas-estación y una jornada efectiva de 8,67 h.

Seis estaciones resultan físicamente inviables: la carga exigiría una utilización de 1,116, superior a la capacidad disponible. Siete estaciones son aritméticamente factibles, pero obligan a operar al 95,7 %, muy por encima del 85 % adoptado como criterio de diseño; el déficit de 6,47 horas-estación exigiría extender la jornada efectiva a 9,59 horas o diferir parte del procesamiento, que es precisamente el comportamiento que el proyecto busca eliminar. Nueve estaciones cumplen el criterio con holgura, pero incorporan capacidad que no se utiliza ni siquiera en la condición de máxima exigencia.

Ocho estaciones constituyen, por tanto, el menor número entero que satisface el criterio de utilización adoptado. El contraste no introduce supuestos adicionales: emplea el mismo parámetro de utilización objetivo declarado antes del dimensionamiento y se apoya en el comportamiento no lineal de la espera frente a utilidades próximas a la unidad, descrito en el Capítulo 2. Este resultado es analítico: se sostiene respecto del modelo de capacidad y del criterio declarado, y no equivale a una verificación operacional, que exigiría haber operado con siete estaciones bajo la misma condición de demanda.

La arquitectura modular resuelve la diferencia entre el régimen ordinario y el máximo: parte de la capacidad permanece asignada al flujo regular y la capacidad restante se activa o dota durante campaña.

4.4.3 Número de Posiciones: Aplicación de la Ley de Little

El número de posiciones con indicador depende del inventario simultáneo de pedidos incompletos. Conforme a la ley de Little, expresada en la Ecuación (2.3), la ocupación media L se obtiene como el producto entre la tasa de ingreso de pedidos que requieren consolidación y su tiempo medio de residencia. Para el dimensionamiento se incorpora además un factor de seguridad f_s :

$$\text{Posiciones de diseño} = L \cdot f_s \quad (4.2)$$

La Tabla 4.6 presenta las posiciones con indicador requeridas para cada condición de demanda.

Tabla 4.6: Posiciones con indicador requeridas según la ley de Little.

Condición	λ pedidos/h que consolidan	Posiciones con W=25 min	Posiciones con W=10 min
Día promedio	45,3	34	14
Campaña: volumen procesado	70,1	53	21
Máximo histórico de ingreso	420,5	315	126

Fuente: Elaboración propia mediante ley de Little, con $f_s = 1,8$.

El resultado muestra que el parámetro crítico no es el número total de pedidos del lote, sino el tiempo durante el cual cada pedido permanece incompleto. Una posición liberada puede ser reutilizada inmediatamente por un nuevo pedido, de modo que el dimensionamiento depende del reuso efectivo y no de una posición física por orden.

4.4.4 Tiempo de Residencia y Verificación de Posiciones

El tiempo de residencia depende del grado de dispersión con que las referencias de un pedido llegan a la estación. La recolección fraccionada por nivel puede extenderlo, mientras una llegada más concentrada aumenta el reuso de las posiciones. En consecuencia, este parámetro conecta directamente la política de recolección con la capacidad del put wall.

La configuración propuesta dispone de 16 posiciones con indicador por estación. Con ocho estaciones se obtienen 128 posiciones activas. Bajo la tasa del máximo histórico y manteniendo el factor de seguridad de 1,8, esta capacidad corresponde a un tiempo de residencia admisible cercano a 10 minutos. En la condición de campaña procesada, cinco estaciones —80 posiciones— admiten aproximadamente 38 minutos bajo el mismo criterio.

4.4.5 Configuración Adoptada

Se adopta una instalación de ocho estaciones PTL, todas incluidas en la inversión inicial. Cinco se consideran parte de la configuración regular del layout y tres constituyen capacidad de campaña. Esta distinción se refiere a su función y nivel de activación/dotación, no necesariamente a que el equipamiento se instale y retire físicamente en cada evento.

Cada estación dispone de cuarenta posiciones físicas: dieciséis con indicador luminoso para pedidos en consolidación y veinticuatro posiciones de buffer para desacoplar clasificación y empaque o gestionar excepciones. La dotación de operarios se ajusta al nivel de carga; que una estación forme parte de la configuración regular no implica que deba estar permanentemente atendida durante toda la jornada. La Tabla 4.7 resume la configuración adoptada para la solución.

Tabla 4.7: Configuración adoptada de la solución PTL.

Elemento	Configuración adoptada	Fundamento
Estaciones instaladas	8	7,9 requeridas bajo máximo histórico
Configuración regular	5 estaciones disponibles	Cobertura por canal, holgura operativa y continuidad
Capacidad de campaña	3 estaciones adicionales	Activación/dotación ante eventos de alta demanda
Posiciones físicas por estación	40	Configuración del equipamiento
Posiciones con indicador	16 por estación	128 totales con 8 estaciones
Posiciones de buffer	24 por estación	Desacople con empaque y gestión de excepciones

Fuente: Elaboración propia.

4.4.6 Escalabilidad en el Horizonte

La arquitectura propuesta permite agregar capacidad por módulos equivalentes sin rediseñar la lógica del sistema. Bajo las tasas de crecimiento consideradas en la tesina, la configuración inicial de ocho estaciones no debe interpretarse como capacidad suficiente

para cualquier crecimiento futuro: corresponde al proyecto base y a la condición histórica utilizada para diseñarlo.

La necesidad y el momento de incorporar estaciones adicionales dependen del crecimiento efectivo, de la evolución del perfil de pedido y de la utilización observada. Por ello, la ampliación se trata como una decisión posterior de capacidad y no como parte de la inversión inicial evaluada en este capítulo.

4.5 Configuración Física y Ergonómica

El diseño físico debe minimizar movimientos innecesarios y situar las posiciones de mayor frecuencia dentro de zonas de alcance y visibilidad favorables. Las dieciséis posiciones con indicador concentran la manipulación repetitiva y, por tanto, deben priorizar el frente de trabajo; las posiciones de buffer, de menor frecuencia, pueden situarse lateralmente o fuera de la zona principal de alcance (Freivalds & Niebel, 2014).

La superficie de escaneo y el lector deben quedar próximos a la posición neutra del operario, y la secuencia de asignación debe priorizar las ubicaciones más accesibles antes de ocupar posiciones superiores o extremas. El diseño final debe además verificarse respecto de los requisitos nacionales aplicables a manipulación manual y factores de riesgo musculoesquelético (Ministerio de Salud de Chile, 2024).

4.6 Correspondencia entre Brechas y Elemento del Diseño

La propuesta transforma la etapa de clasificación sin modificar la política de recolección por lotes. La correspondencia entre las brechas del diagnóstico y los elementos de diseño se resume en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Correspondencia entre brechas priorizadas y elementos del diseño.

Brecha priorizada	Elemento del diseño	Efecto esperado
Cierre documental condicionado al grupo	Cierre y emisión por pedido	Desacopla pedidos completos del lote
Clasificación manual	Guiado luminoso + confirmación	Reduce identificación manual y genera trazabilidad
Llegada fraccionada	Asignación persistente de posición	Admite referencias en carros/momentos distintos
Conformación manual	Generación del grupo desde sistema	Reduce dependencia de planilla y recurso único
Variabilidad de campaña	8 estaciones con activación modular	Separa capacidad instalada de dotación permanente

Fuente: Elaboración propia.

El capítulo siguiente contrasta esta configuración y sus supuestos con el registro transaccional obtenido después de la implementación. La validación se concentra en tres niveles: estabilidad de la demanda, representatividad de los parámetros de desempeño y suficiencia de la configuración resultante.

5 Validación del dimensionamiento y evaluación del desempeño

El presente capítulo contrasta el procedimiento de dimensionamiento desarrollado en el capítulo anterior con el comportamiento observado después de la implementación del sistema Put to Light. El estudio fue formulado originalmente como una evaluación de factibilidad ex-ante; sin embargo, durante su desarrollo la solución fue implementada, lo que permitió disponer de un registro transaccional de operación real y reemplazar la estimación puramente prospectiva por una validación ex-post.

El contraste se estructura en tres niveles: estabilidad de los parámetros de demanda utilizados en el diagnóstico, representatividad de los parámetros de desempeño empleados en el diseño y consistencia de la configuración dimensionada con la implementación observada. Esta lógica sigue la distinción entre verificación y validación de modelos: no basta con comprobar que el resultado final coincide, sino que es necesario examinar también los supuestos y parámetros que conducen a él (Sargent, 2013).

La coincidencia entre el diseño y la configuración implementada se interpreta como evidencia de consistencia y suficiencia para las condiciones observadas, no como demostración de que la configuración sea mínima u óptima. Esta distinción resulta relevante, dado que una solución puede operar correctamente aun cuando exista capacidad ociosa.

5.1 Base de contraste y tratamiento de los datos

La base de contraste corresponde al registro transaccional del sistema PTL, en el cual cada fila representa una confirmación unitaria realizada en una posición de clasificación. El conjunto disponible comprende 98.333 confirmaciones correspondientes al período entre el 1 de abril y el 27 de julio de 2026, con 81 días de operación efectiva, 72.399 pedidos atendidos, 1.134 olas ejecutadas y 6.175 referencias distintas.

La depuración verificó ausencia de duplicados, valores nulos en campos críticos y fechas fuera del período de análisis. Se conservaron cinco registros con marca de reporte incompleta, equivalentes al 0,005 % de la base, por corresponder a confirmaciones efectivamente ejecutadas y no afectar materialmente los indicadores agregados.

Los volúmenes presentados en este capítulo deben interpretarse bajo el mismo criterio de confidencialidad definido en el Capítulo 1: las magnitudes operacionales mostradas son representativas de la estructura real de la operación y preservan sus proporciones internas. Los indicadores relativos como la composición de la demanda, las relaciones entre variables, los intervalos y la utilización, son los elementos centrales del contraste.

5.2 Construcción de los Indicadores de Desempeño

Para cada combinación estación-día se define la ventana operativa como el intervalo comprendido entre la primera y la última confirmación registrada. El tiempo efectivo se calcula como la suma de los intervalos entre confirmaciones consecutivas iguales o inferiores a 300 segundos. Los intervalos superiores a dicho umbral se interpretan como interrupciones o períodos sin alimentación continua de la estación.

El umbral de 300 segundos se fundamenta empíricamente: el 98,2 % de los intervalos observados se encuentra por debajo de ese valor, permitiendo separar la población dominante de trabajo continuo de una cola de interrupciones prolongadas. A partir de esta definición se calculan dos métricas distintas: el rendimiento durante tiempo efectivo y la proporción de la ventana operativa que presenta actividad continua.

Se utiliza además el intervalo mediano entre confirmaciones consecutivas como indicador del ritmo característico de ejecución. Este indicador corresponde a un intervalo de ciclo observado y no a takt time, ya que este último se deriva de la demanda requerida y del tiempo disponible. Los 11,3 segundos observados representan, por tanto, el intervalo característico registrado entre confirmaciones consecutivas durante la operación. La Figura 5.1 descompone la ventana operativa observada de las estaciones.

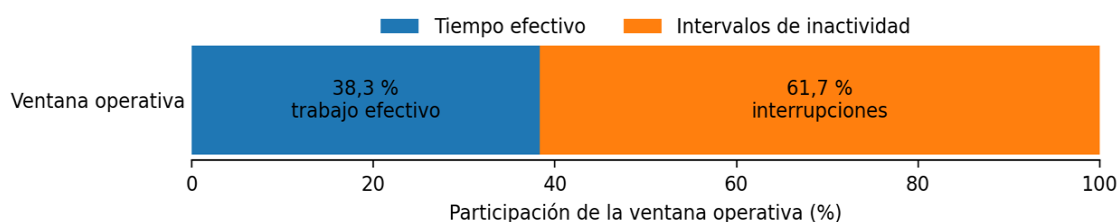


Figura 5.1: Composición de la ventana operativa observada de las estaciones PTL.
Fuente: Elaboración propia a partir del registro transaccional del sistema.

El capítulo tampoco proporciona una medición directa de la reducción de errores de despacho. Los registros PTL permiten caracterizar ritmo, utilización y ocupación, pero no identifican de manera sistemática si un pedido llegó correctamente al cliente final. Por ello, la reducción de errores utilizada en la evaluación económica debe mantenerse como supuesto sustentado en literatura y sometido a sensibilidad, no como resultado empírico validado en este capítulo.

5.3 Contraste de los Parámetros de Demanda

Los parámetros de composición utilizados en el diagnóstico se derivaron de los doce meses anteriores a la implementación. Su comparación con el período postimplementación permite evaluar si la estructura de la demanda sobre la cual se dimensionó la solución se mantuvo estable. La Tabla 5.1 contrasta los parámetros de composición entre ambos períodos.

Tabla 5.1: Contraste de los parámetros de composición de la demanda.

Parámetro	Diagnóstico	Observado abr.–jul. 2026	Desviación
Líneas por pedido	1,36	1,36	Nula
Líneas por pedido multi-referencia	2,44	2,50	2,5 %
Pedidos multi-referencia	25,2 %	23,8 %	1,4 puntos
Unidades multi-referencia	45,8 %	43,9 %	1,9 puntos
Razón día peak / día mediano	16,7	16,1	3,6 %

Fuente: Elaboración propia a partir de registros históricos y del registro transaccional PTL.

Las desviaciones son reducidas en los cinco parámetros contrastados, con un máximo de 3,6 %. Esto respalda el uso de la estructura histórica de la demanda como base del dimensionamiento. El resultado no implica que el volumen absoluto sea estable, sino que las relaciones internas relevantes para el diseño —profundidad de pedido, proporción multi-referencia y grado de estacionalidad— se mantuvieron dentro de rangos similares. La estacionalidad también se mantiene como rasgo dominante: junio concentró el 57,1 % de las confirmaciones del período observado, con un máximo diario de 8.653 unidades frente a una mediana de 538. La razón aproximada de 16 a 1 entre máximo y mediana es consistente con la caracterización de estacionalidad extrema utilizada en el diseño.

5.4 Contraste de los Parámetros de Desempeño

Los parámetros de desempeño utilizados en el dimensionamiento provinieron del estudio de tiempos disponible al momento del diseño. El registro transaccional permite evaluar su representatividad y, cuando corresponde, identificar los supuestos que requieren corrección. La Tabla 5.2 presenta ese contraste para los parámetros de desempeño.

Tabla 5.2: Contraste de los parámetros de desempeño utilizados en el diseño.

Parámetro	Supuesto de diseño	Observado	Interpretación
Intervalo característico por confirmación	13,1 s	11,3 s (mediana)	Ritmo puntual más rápido que el supuesto
Unidades por hora efectiva	≈274 u/h	192,6 u/h	Promedio efectivo inferior al valor derivado del tiempo unitario
Proporción de tiempo efectivo en la ventana	No estimada	38,3 %	Variable no incorporada explícitamente en el diseño
Tiempo de residencia en posición	25 min	≈8,5 min	Supuesto conservador; sobrestimación cercana a 3 veces
Pedidos por ola	40 (referencia de carro)	63,6 promedio	Lote efectivo superior a la referencia

Fuente: Elaboración propia a partir del estudio de tiempos y del registro transaccional PTL.

El intervalo mediano de 11,3 segundos indica que, durante secuencias continuas de trabajo, la confirmación puede ejecutarse a un ritmo superior al supuesto de 13,1 segundos. Esto no contradice el rendimiento de 192,6 unidades por hora efectiva: la mediana representa el centro de una distribución asimétrica de intervalos, mientras que el rendimiento horario incorpora la totalidad de los tiempos considerados efectivos bajo el umbral adoptado. Por ello ambos indicadores deben interpretarse de manera complementaria y no como recíprocos exactos.

La desviación de mayor incidencia sobre el dimensionamiento de posiciones corresponde al tiempo de residencia. El supuesto de 25 minutos resultó aproximadamente tres veces superior al valor implícito observado, cercano a 8,5 minutos. Este último se obtiene aplicando de forma inversa la ley de Little al reuso efectivo de posiciones, relacionando ocupación simultánea, tasa de ingreso y permanencia promedio (Little, 1961). La evidencia muestra que una misma posición puede ser reutilizada varias veces dentro de una ola, por lo que estimar la residencia a partir del tiempo total de completitud del pedido sobrestima el inventario simultáneo de pedidos incompletos.

La configuración adoptada de dieciséis posiciones con indicador por estación resultó suficiente durante el período observado. En consecuencia, la corrección metodológica no consiste en modificar retrospectivamente el diseño, sino en establecer que futuros dimensionamientos deben estimar la residencia sobre el reuso real de posiciones y no sobre el tiempo total transcurrido entre el inicio y el cierre del pedido.

5.5 Utilización Observada y Desplazamiento de la Restricción

El registro acumuló 1.332,3 horas de ventana operativa y 510,4 horas clasificadas como tiempo efectivo, equivalentes a una utilización operativa observada de 38,3 % bajo la definición adoptada. Las 821,9 horas restantes corresponden a intervalos superiores a cinco minutos entre confirmaciones consecutivas.

Esta métrica no debe confundirse directamente con la utilización teórica ρ utilizada para dimensionar capacidad. El 0,85 empleado en el diseño representa un criterio de carga objetivo respecto de capacidad disponible; el 38,3 % representa la fracción empírica de la

ventana registrada en que existió trabajo continuo según un umbral temporal. Aunque ambas métricas se relacionan con el uso de recursos, sus denominadores y propósitos son distintos.

La combinación de un ritmo elevado durante los períodos activos y una fracción importante de tiempo sin confirmaciones es consistente con un desplazamiento de la restricción aguas arriba: una vez eliminada la clasificación manual, la estación dispone de capacidad para procesar el trabajo que recibe, pero permanece sin alimentación durante una parte relevante de su ventana operativa. La evidencia apunta hacia la liberación y secuenciación de olas y hacia la llegada de unidades desde picking como factores de alimentación del sistema.

Bajo el supuesto de mantener constante el rendimiento durante tiempo efectivo, elevar la utilización operativa desde 38,3 % hasta 60 % permitiría aumentar el volumen procesable en aproximadamente 57 % sin incrementar el número de estaciones. Este valor debe interpretarse como potencial teórico de aprovechamiento de la capacidad instalada, no como una garantía de incremento, ya que una mayor alimentación podría desplazar nuevamente la restricción hacia empaque u otra etapa posterior.

5.6 Contraste de la Configuración Dimensionada

La Tabla 5.3 contrasta la configuración propuesta en el diseño con la efectivamente implementada.

Tabla 5.3: Contraste entre la configuración propuesta y la implementación observada.

Elemento	Diseño propuesto	Implementación observada	Resultado del contraste
Estaciones permanentes	5	5	Coincidencia
Estaciones disponibles en campaña	8	8	Coincidencia
Posiciones con indicador por estación	16	16	Coincidencia
Posiciones con indicador totales en campaña	128	128	Coincidencia

Fuente: Elaboración propia.

La coincidencia de los cuatro elementos confirma que la arquitectura propuesta es consistente con una configuración que operó satisfactoriamente durante el período observado, incluido un evento de alta intensidad. Esta evidencia demuestra suficiencia operacional, pero no minimalidad empírica. El contraste analítico de la Tabla 4.5 establece que ocho estaciones constituyen el menor número entero compatible con el criterio de utilización adoptado; verificar ese resultado en operación exigiría haber trabajado con siete o menos estaciones activas bajo una condición de demanda equivalente, lo que no ocurrió durante el período observado.

La modularidad también mostró factibilidad operacional: las estaciones incorporadas durante el período de mayor demanda alcanzaron rendimientos del mismo orden que las permanentes en pocos días de operación. Este comportamiento es coherente con una curva de aprendizaje breve y respalda el uso de capacidad temporal en campañas, aunque no permite cuantificar por sí solo el costo total de incorporación de personal eventual.

6 Evaluación Económica

El presente capítulo evalúa la conveniencia económica de la implementación del sistema Put to Light mediante un flujo de caja incremental a cinco años. El análisis compara la situación con proyecto con el escenario que enfrentaría la operación si mantuviera el método actual, cuantifica la inversión, los costos y los beneficios incrementales, y evalúa la robustez del resultado mediante sensibilidad, escenarios y valores umbral. La estructura sigue el principio de incrementalidad empleado en evaluación de proyectos (Sapag Chain et al., 2014).

6.1 Criterio de evaluación y tratamiento de la confidencialidad

La evaluación económica se desarrolla sobre la escala real de la operación. Este criterio es deliberadamente distinto del tratamiento aplicado a los volúmenes operacionales presentados en los capítulos anteriores, los cuales se muestran transformados mediante un factor de escala no revelado con fines de confidencialidad. La transformación protege la magnitud del negocio, pero no debe alterar la decisión de inversión.

En consecuencia, los valores de CAPEX, soporte y otros costos fijos corresponden a montos efectivos o estimaciones directamente vinculadas al proyecto, mientras que los beneficios dependientes del volumen como la dotación evitada, sobrecostos de campaña y los errores de despacho evitados, deben calcularse utilizando los volúmenes equivalentes de la operación real. De esta manera, la anonimización afecta la presentación de los datos operacionales, pero no la economía con la que se evalúa el proyecto.

La evaluación se desarrolla mediante flujos incrementales antes de impuestos y expresados en pesos constantes. En consecuencia, no se incorporan impuesto a la renta, depreciación ni efectos tributarios asociados al financiamiento o a la inversión. Esta

convención se adopta para evaluar el efecto económico atribuible a la solución con independencia de la estructura de financiamiento y de la situación tributaria particular de la empresa. Todos los costos y beneficios se expresan bajo la misma base, manteniendo consistencia entre los escenarios con proyecto y sin proyecto.

Los flujos se proyectan en pesos constantes; por tanto, no se incorpora inflación general durante el horizonte y los incrementos de beneficios asociados al volumen responden al crecimiento esperado de la demanda. Para actualizar los flujos se adopta una tasa de descuento real anual de 12 % como tasa de evaluación del escenario base. Este valor se trata como un supuesto de evaluación y no como una estimación del WACC específico de la empresa. La metodología de evaluación y el tratamiento de la incertidumbre siguen el enfoque de flujos incrementales y sensibilidad descrito en el Capítulo 2 (Sapag Chain et al., 2014).

6.2 Escenario sin proyecto

El escenario sin proyecto no corresponde a congelar indefinidamente la operación en su configuración actual. La demanda proyectada obliga al operador a incorporar recursos adicionales o extender jornadas cuando el volumen supera la capacidad del método vigente. Por ello, el escenario base debe representar el costo de continuar operando sin la solución tecnológica mientras la demanda crece.

La Ley N.º 21.561 establece una reducción gradual de la jornada ordinaria en Chile: 42 horas semanales desde el 26 de abril de 2026 y 40 horas desde el 26 de abril de 2028 (Ley N.º 21.561, 2023). Esta modificación debe incorporarse en la proyección del costo laboral cuando corresponda, dado que reduce las horas ordinarias disponibles por trabajador a lo largo del horizonte.

6.3 Inversión y costos operacionales

6.3.1 Inversión inicial

La inversión comprende el desarrollo e implementación del sistema integrado para fulfillment, las ocho estaciones Put to Light y la configuración funcional requerida sobre el sistema de gestión empresarial. La Tabla 6.1 resume el monto actualmente utilizado en la evaluación.

Tabla 6.1: Composición de la inversión inicial.

Componente	Monto (CLP)	Fuente / criterio
Diseño, desarrollo e implementación de ocho estaciones Put to Light	67.040.000	Cotización del proveedor
Configuración sobre el sistema de gestión empresarial	2.250.000	25 h × 90.000 CLP/h; estimación conservadora
Subtotal	69.290.000	—
Contingencia (10 %)	6.929.000	Criterio de evaluación
Inversión total	76.219.000	—

Fuente: Elaboración propia a partir de la cotización del proveedor y estimaciones de integración.

6.3.2 Costos operacionales incrementales

El proyecto incorpora un contrato de soporte de software y hardware por 1.100.000 pesos mensuales, equivalente a 13.200.000 pesos anuales. Este monto representa aproximadamente 17,3 % de la inversión inicial y se incorpora como egreso recurrente durante todo el horizonte. El consumo de etiquetas y materiales de embalaje no se considera incremental, dado que la solución modifica el mecanismo de clasificación y emisión, pero no el número de pedidos que requieren estos insumos.

6.4 Beneficios incrementales

El modelo identifica cuatro fuentes de beneficio: dotación evitada, menor sobre costo durante campañas, reducción de errores de despacho y liberación de tiempo de supervisión. Los tres primeros dependen directamente del volumen y, por tanto, deben evaluarse sobre la escala real de la operación.

6.4.1 Dotación y sobre costos de campaña evitados

La solución interviene principalmente la clasificación y consolidación. A medida que la demanda aumenta, el escenario sin proyecto requiere incrementar recursos para sostener el método manual, mientras que el escenario con proyecto utiliza la capacidad de las estaciones PTL y recurre a personal adicional principalmente durante campañas. La diferencia entre ambos escenarios constituye el beneficio por dotación evitada.

El segundo componente corresponde a las horas extraordinarias y refuerzos temporales asociados a eventos comerciales. La solución no elimina la necesidad de reforzar la recolección, pero reduce el crecimiento proporcional de recursos en la etapa de clasificación. En el escenario base, ambos componentes aumentan con la demanda a lo largo del horizonte.

6.4.2 Reducción de errores de despacho

La reducción de errores constituye el beneficio económico más sensible del modelo. La operación estima una tasa de error de despacho entre 2 % y 3 % en régimen ordinario y de hasta 4 % en campaña. Esta tasa no proviene de un registro sistemático y, por tanto, debe tratarse como parámetro incierto.

Como referencia externa, Wulfraat (2013) reporta para sistemas Pick to Light exactitudes del orden de 99,5 % a 99,7 %. Además, Łopuszyński et al. (2025), en un estudio experimental de laboratorio, observaron una tasa de errores de 6,86 % con Pick-by-Paper

y 2,31 % con Pick-by-Light. Estas evidencias respaldan la dirección esperada del efecto del guiado luminoso, pero no permiten atribuir directamente esos porcentajes a un sistema Put to Light operando en la configuración del caso estudiado.

Por esta razón, el escenario base adopta una reducción relativa del 84 % y somete este parámetro a análisis de sensibilidad. El valor corresponde a un supuesto económico sustentado en referencias externas y no a un resultado observado de la implementación, ya que el Capítulo 5 no dispone de un registro postimplementación de errores de despacho.

6.4.3 Costo unitario del error

El costo de una incidencia no corresponde únicamente al transporte inverso. Conceptualmente, la logística reversa comprende recepción del retorno, inspección, clasificación, reacondicionamiento, reintegro al inventario y transporte asociado (Rogers & Tibben-Lembke, 2001; Bernon et al., 2011). En un error de despacho debe considerarse además el nuevo envío necesario para completar correctamente la orden.

El escenario base utiliza un costo unitario de 7.500 pesos por incidencia. Este monto se construye a partir de tarifas y estimaciones locales de transporte, inspección, reembalaje y reingreso a inventario. La literatura académica citada respalda la estructura conceptual del costo, mientras que su magnitud se trata como un parámetro sujeto a sensibilidad por provenir de estimaciones locales.

6.4.4 Liberación de tiempo de supervisión

La automatización de la conformación de los grupos de trabajo libera aproximadamente 20 a 30 minutos diarios de la supervisora. Su impacto monetario es reducido frente a los demás componentes, pero elimina una dependencia de recurso único y desplaza tiempo desde una actividad administrativa hacia coordinación y control operacional.

6.5 Flujo de caja e indicadores de rentabilidad

La Tabla 6.2 presenta el flujo de caja incremental del escenario base a cinco años, construido con los supuestos operacionales y económicos definidos en las secciones anteriores. Los resultados se interpretan conjuntamente con los análisis de sensibilidad, escenarios y valores umbral desarrollados en la sección 6.6, debido a la incertidumbre asociada principalmente a la tasa de error, su reducción atribuible al PTL, el costo unitario de cada incidencia y la evolución de la demanda.

Tabla 6.2: Flujo de caja incremental del escenario base (CLP).

Año	Dotación evitada	Campaña evitada	Errores evitados	Supervisión	Soporte	Flujo neto
0	—	—	—	—	—	(76.219.000)
1	5.662.500	8.179.945	37.196.972	595.238	(13.200.000)	38.434.655
2	15.388.828	9.202.438	41.846.593	595.238	(13.200.000)	53.833.098
3	23.312.432	10.352.743	47.077.418	595.238	(13.200.000)	68.137.830
4	32.226.486	11.646.836	52.962.095	595.238	(13.200.000)	84.230.654
5	42.254.796	13.102.690	59.582.357	595.238	(13.200.000)	102.335.081

Fuente: Elaboración propia.

Aplicando la tasa de descuento real anual de 12 % definida en la Sección 6.1 al flujo incremental antes de impuestos y expresado en pesos constantes, se obtiene un VAN de 161.110.011 pesos, una TIR de 66,5 % y un período de recuperación descontado durante el segundo año. El cociente VAN/inversión alcanza 2,11, es decir, el valor neto creado equivale a 2,11 veces la inversión inicial. La Tabla 6.3 reúne estos indicadores de rentabilidad.

Tabla 6.3: Indicadores de rentabilidad del escenario base.

Indicador	Resultado
VAN a 12 %	161.110.011 CLP
TIR	66,5 %
Payback descontado	Durante el año 2
VAN / inversión inicial	2,11

Fuente: Elaboración propia.

6.6 Análisis de riesgo

6.6.1 Sensibilidad y escenarios

El análisis de sensibilidad examina los parámetros que presentan mayor incertidumbre: crecimiento de la demanda, costo unitario del error, tasa de error actual y porcentaje de reducción atribuible al sistema. En el escenario base, el VAN permanece positivo ante variaciones individuales dentro de los rangos evaluados, mientras que la combinación simultánea de supuestos desfavorables puede volver negativo el proyecto.

Tabla 6.4: Sensibilidad univariante del flujo escenario base.

Parámetro	Valor caso Base	Valor evaluado	VAN (CLP)
Caso base	—	—	161.110.011
Crecimiento	12,5 %	5 %	70.637.302
Crecimiento	12,5 %	15 %	184.090.977
Costo unitario del error	7.500	4.500	94.091.129
Costo unitario del error	7.500	10.500	228.128.892
Reducción atribuible	84 %	50 %	93.293.285
Reducción atribuible	84 %	90 %	173.077.668
Tasa de error actual	2,5 %	2,0 %	129.196.279
Tasa de error actual	2,5 %	3,0 %	193.023.786

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 6.4 evalúa cada parámetro de forma independiente, manteniendo los demás en su valor del caso base. Los rangos evaluados no son simétricos respecto de dicho valor: el crecimiento se examina entre 5 % y 15 % en torno a un caso base de 12,5 %, y la reducción atribuible entre 50 % y 90 % en torno a 84 %. Por esta razón las variaciones del VAN hacia abajo y hacia arriba no presentan la misma magnitud, aunque la dirección del efecto es en todos los casos la esperada: valores inferiores al caso base reducen el valor del proyecto y valores superiores lo aumentan.

Medida por la amplitud entre los extremos evaluados, la mayor sensibilidad corresponde al costo unitario del error (134,0 millones) y al crecimiento de la demanda (113,5 millones), seguidos por la reducción atribuible (79,8 millones) y la tasa de error actual

(63,8 millones). Los parámetros asociados a la exactitud actúan de manera aproximadamente proporcional sobre el valor presente del beneficio por errores, mientras que el crecimiento de la demanda presenta un comportamiento no lineal, dado que afecta simultáneamente a los tres beneficios dependientes del volumen a lo largo de todo el horizonte.

Como verificación complementaria, se evaluó la sensibilidad del VAN frente a la tasa de descuento manteniendo sin cambios los flujos del escenario base. Con una tasa de 10 %, el VAN alcanza aproximadamente 175,5 millones de pesos; con la tasa base de 12 %, 161,1 millones; y con una tasa de 15 %, 141,7 millones. En este rango, el VAN permanece positivo, por lo que la conclusión económica del escenario base no depende exclusivamente de la tasa de 12 % adoptada.

La Tabla 6.5 reúne los escenarios contruidos a partir del modelo económico y de los rangos definidos para sus principales parámetros inciertos.

Tabla 6.5: Escenarios de evaluación económica.

Escenario	Supuestos principales	VAN (CLP)	TIR
Pesimista	Crecimiento 5 %; costo error 4.500; reducción atribuible 50 %; error actual 2 %	(20.554.320)	2,1 %
Base	Crecimiento 12,5 %; costo error 7.500; reducción atribuible 84 %; error actual 2,5 %	161.110.011	66,5 %
Optimista	Crecimiento 15 %; costo error 10.500; reducción atribuible 90 %; error actual 3 %	335.889.880	114,3 %

Fuente: Elaboración propia.

El escenario pesimista confirma que la conveniencia no es incondicional. El resultado depende especialmente de la capacidad de la solución para evitar errores de clasificación y del costo económico real de cada incidencia.

6.6.2 Valores umbral

Como complemento, se calculó el valor que debería adoptar cada parámetro para que el VAN se iguale a cero, manteniendo constantes los demás supuestos. Al reconstruir estos umbrales directamente desde el flujo resumido de la Tabla 6.2 se obtienen los valores de la Tabla 6.6.

Tabla 6.6: Valores umbral del escenario base.

Parámetro	Valor umbral aproximado	Interpretación
Inversión inicial	237.329.011 CLP	Máxima inversión inicial compatible con VAN = 0
Soporte mensual	4.824.457 CLP/mes	Costo mensual máximo compatible con VAN = 0
Costo unitario del error	≈ 288 CLP/incidencia	Umbral suponiendo proporcionalidad lineal del beneficio por errores

Fuente: Elaboración propia.

6.7 Composición del valor y discusión

La composición del valor permite identificar qué beneficios sostienen la decisión. En el escenario base, y descontando los beneficios al 12 %, la reducción de errores representa aproximadamente 58,8 % del valor presente de los beneficios, la dotación evitada 27,5 %, el menor sobre costo de campaña 12,9 % y la liberación de supervisión 0,8 %. La Tabla 6.7 detalla esta participación.

Tabla 6.7: Participación de los beneficios en valor presente del escenario base.

Componente	Valor presente aproximado (CLP)	Participación
Reducción de errores	167.547.204	58,8 %
Dotación evitada	78.374.032	27,5 %
Sobre costo de campaña evitado	36.845.121	12,9 %
Liberación de supervisión	2.145.700	0,8 %

Fuente: Elaboración propia.

Esta descomposición confirma que la exactitud es un componente decisivo del caso. De hecho, al eliminar completamente del escenario base el beneficio asociado a errores, el VAN a 12 % se reduce aproximadamente a -6,4 millones de pesos. Por lo tanto, con los supuestos actuales, el proyecto no se justifica únicamente por dotación y campaña: la valoración del costo de la no calidad es determinante para la conclusión económica.

6.8 Limitaciones de la evaluación

- Los resultados monetarios dependen de que los beneficios asociados al volumen se calculen sobre la escala real de la operación; por confidencialidad, dicha escala no se presenta en los capítulos operacionales, aunque debe mantenerse en el modelo económico.
- La capacidad efectiva del escenario sin proyecto no fue determinada mediante una prueba independiente de saturación; por ello, el momento y la magnitud de las contrataciones evitadas dependen del supuesto de capacidad adoptado y deben interpretarse conjuntamente con el análisis de sensibilidad.
- La tasa de error actual es una estimación operacional y la reducción atribuible al PTL proviene de referencias externas y análisis de sensibilidad, no de una medición postimplementación.
- El costo unitario de un error se construye a partir de estimaciones y tarifas locales y, por tanto, constituye un parámetro sujeto a incertidumbre dentro de la evaluación económica.
- La evaluación no incorpora el valor económico del cumplimiento de nivel de servicio ni eventuales penalizaciones o ventas perdidas durante campañas.
- La configuración evaluada corresponde a la instalación inicial de ocho estaciones y no incorpora automáticamente futuras ampliaciones de capacidad.
- La tasa de descuento real anual de 12 % se adopta como parámetro de evaluación del escenario base y no corresponde a una estimación del costo de capital específico de la empresa. Por esta razón, los indicadores financieros deben interpretarse dentro de la convención antes de impuestos y en pesos constantes definida en la Sección 6.1, considerando además el rango de tasas contrastado en el análisis de sensibilidad.

Estas limitaciones no invalidan el método de evaluación, pero requieren que los indicadores financieros se interpreten dentro de los supuestos y rangos de sensibilidad definidos para el escenario base.

7 Comparación de Alternativas Tecnológicas

Los capítulos precedentes establecieron el problema operacional, diseñaron la solución Put to Light y evaluaron su desempeño y conveniencia económica. El presente capítulo examina si dicha solución resulta preferible frente a otras alternativas capaces de resolver la misma necesidad: transformar el flujo por producto generado por la preparación por lotes en un flujo organizado por pedido. La comparación se realiza mediante un modelo de puntuación ponderada, consistente con el método y los criterios establecidos en el Capítulo 2 (Belton & Stewart, 2002).

El análisis no pretende establecer una tecnología universalmente superior. Su propósito es identificar la alternativa que presenta el mejor ajuste al perfil del caso estudiado, considerando simultáneamente exactitud, comportamiento frente a la estacionalidad, restricciones físicas, inversión y complejidad de implementación.

7.1 Alcance y alternativas consideradas

Se comparan únicamente alternativas que resuelven directamente la etapa de clasificación y consolidación posterior al batch picking, manteniendo el alcance definido para la tesina. Los sistemas goods-to-person y otras soluciones de automatización integral no se incluyen porque modifican de manera sustantiva la etapa de recolección y, por tanto, corresponden a un problema de inversión diferente al evaluado.

- Clasificación manual posterior. Configuración de referencia sin inversión tecnológica adicional: los ítems del lote se separan por pedido en la estación mediante identificación manual.
- Clasificación durante la recolección (sort-while-pick). El operario separa cada ítem en contenedores asociados a pedidos mientras ejecuta el recorrido. Reduce la clasificación posterior, pero limita el tamaño del lote al número de compartimentos disponibles y exige mantener la separación durante el picking (de Koster et al., 2007; Boysen et al., 2019).

- Clasificación asistida por radiofrecuencia. El sistema identifica el pedido de destino después del escaneo, pero la localización física de la posición continúa dependiendo de la lectura del terminal y de la acción del operario.
- Clasificación asistida por el sistema Put to Light. El sistema asigna el pedido a una posición y activa una señal luminosa sobre su destino, registrando la confirmación de la depositación (Boysen et al., 2020; Mecalux, 2024).
- Clasificador automático. La separación se realiza mediante equipamiento mecanizado de mayor capacidad, pero con mayor inversión, superficie y complejidad de implementación; su pertinencia depende del volumen y de la estabilidad de la operación (Wulfraat, 2013).

7.2 Criterios y ponderación

Los ocho criterios utilizados corresponden a los establecidos en el Capítulo 2. Para evitar circularidad, sus pesos se fundamentan principalmente en las brechas y restricciones identificadas en el diagnóstico, y no en los resultados económicos obtenidos posteriormente para la solución Put to Light. La evaluación económica del Capítulo 6 se utiliza únicamente como contraste posterior de consistencia. La Tabla 7.1 presenta los criterios de evaluación y su ponderación base.

Tabla 7.1: Criterios de evaluación y ponderación base.

Criterio	Peso	Fundamento en el diagnóstico
Exactitud de la clasificación	25 %	La clasificación manual sin verificación se asocia a la tasa estimada de error de 2–3 %, hasta 4 % en campaña.
Escalabilidad ante campaña	20 %	La demanda extrema genera diferimiento de varios días y exige capacidad adicional temporal.
Tolerancia a llegada fraccionada	15 %	La recolección por niveles provoca que referencias de un mismo pedido arriben en momentos y carros distintos.
Inversión inicial	12 %	La solución debe ser justificable como proyecto de automatización de alcance intermedio.
Costo operacional incremental	10 %	El soporte y mantenimiento afectan la sostenibilidad del proyecto durante el horizonte.
Flexibilidad ante surtido/canal	8 %	La operación atiende distintos canales y un surtido de alta granularidad.
Superficie requerida	5 %	Existe una restricción física, aunque no fue identificada como la principal limitación del proceso.
Plazo y complejidad de implementación	5 %	La integración con los sistemas existentes es necesaria, pero no constituye la brecha operacional dominante.

Fuente: Elaboración propia a partir de los criterios definidos en el Capítulo 2 y de las prioridades del diagnóstico del Capítulo 3.

7.3 Escala de valoración y matriz de evaluación

En la siguiente Tabla 7.2 se presenta una matriz de evaluación multicriterio. Cada alternativa se califica en una escala ordinal de 1 a 5, donde 1 representa un desempeño muy desfavorable y 5 un desempeño muy favorable respecto del criterio analizado. Las puntuaciones sintetizan la literatura revisada en el Capítulo 2 y las condiciones particulares del caso. Por tanto, deben interpretarse como una herramienta de apoyo a la decisión y no como mediciones físicas equivalentes entre criterios.

Tabla 7.2: Matriz de evaluación multicriterio.

Alternativa	C1 25 %	C2 20 %	C3 15 %	C4 12 %	C5 10 %	C6 8 %	C7 5 %	C8 5 %
Manual posterior	1	1	1	5	2	5	5	5
Durante la recolección	3	2	1	4	3	4	5	4
Asistida por RF	3	3	3	4	4	4	4	4
Put to Light	5	5	5	3	3	3	3	3
Clasificador automático	5	4	4	1	2	2	1	1

Fuente: Elaboración propia a partir de de Koster et al. (2007), Boysen et al. (2019, 2020), Wulfraat (2013), Mecalux (2024) y las restricciones identificadas en el caso.

7.4 Resultados de la ponderación base

El puntaje total se obtiene mediante la suma ponderada de las puntuaciones de cada criterio. Bajo la ponderación base, el Put to Light obtiene el mayor resultado, seguida por la clasificación asistida por radiofrecuencia. La Tabla 7.3 presenta el puntaje ponderado y el ordenamiento resultante.

Tabla 7.3: Puntaje ponderado y ordenamiento.

Orden	Alternativa	Puntaje	Interpretación
1	Put to Light	4,20	Alternativa preferida para el perfil del caso
2	Asistida por radiofrecuencia	3,40	Alternativa competitiva de menor inversión
3	Clasificador automático	3,23	Alto desempeño, penalizado por inversión y superficie
4	Durante la recolección	2,85	Limitada por compartimentos y recolección por niveles
5	Manual posterior	2,30	Configuración de referencia sin inversión

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7.1 representa gráficamente estos puntajes.

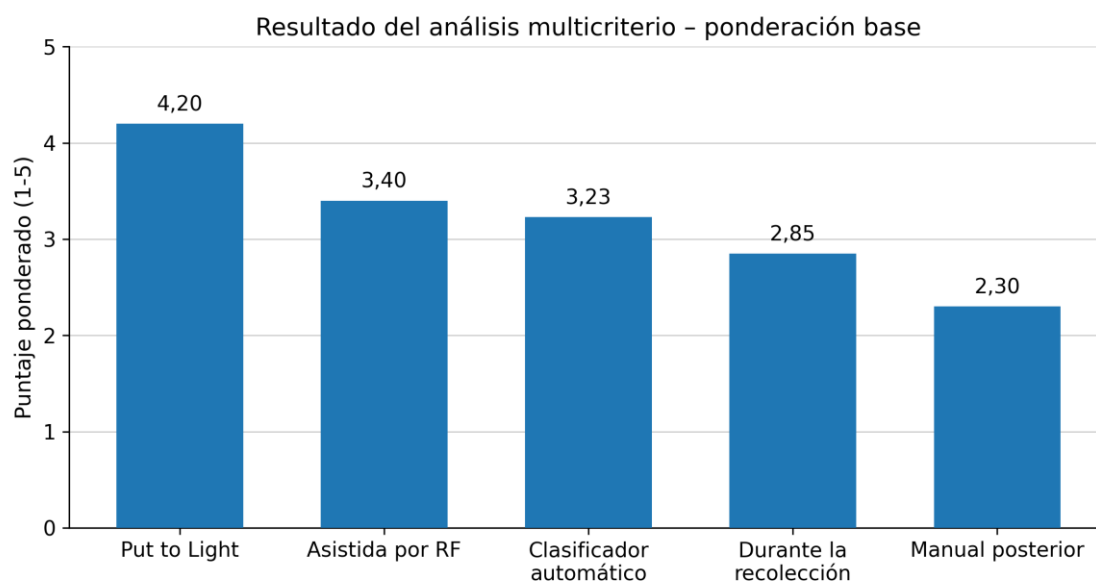


Figura 7.1: Resultado del análisis multicriterio bajo la ponderación base.

Fuente: Elaboración propia a partir de la Tabla 7.2.

La ventaja del PTL se concentra en los tres criterios de mayor peso: exactitud, escalabilidad y tolerancia a la llegada fraccionada. La radiofrecuencia presenta un desempeño más equilibrado en inversión, costo y flexibilidad, pero no elimina en igual medida la búsqueda física de la posición de destino. El clasificador automático alcanza un desempeño operacional alto, aunque su perfil de inversión y superficie resulta menos compatible con el alcance y volumen del caso.

7.5 Robustez del resultado

7.5.1 Variación aleatoria de los pesos

Para evaluar la sensibilidad a la ponderación, se generaron 1.000 conjuntos alternativos de pesos. En cada realización, cada peso base se multiplicó por un factor aleatorio uniforme entre 0,5 y 1,5 y posteriormente se normalizó el conjunto para conservar una suma igual a uno. Manteniendo fija la matriz de puntuaciones de la Tabla 7.2, el PTL obtuvo el mayor puntaje en las 1.000 realizaciones.

7.5.2 Escenarios de ponderación alternativos

Se construyen además tres escenarios transparentes para examinar cómo cambia el ordenamiento cuando se modifica deliberadamente la prioridad de decisión. El escenario económico concentra 50 % del peso en inversión y costo operacional; el escenario operacional concentra 75 % en exactitud, escalabilidad y tolerancia a la fragmentación; el escenario uniforme asigna igual peso a los ocho criterios. La Tabla 7.4 presenta el ordenamiento obtenido bajo cada escenario.

Tabla 7.4: Ordenamiento bajo escenarios de ponderación alternativos.

Alternativa	Prioridad económica ¹	Prioridad operacional ²	Ponderación uniforme
Manual posterior	3,20 (4.º)	1,85 (5.º)	3,12 (4.º)
Durante la recolección	3,35 (3.º)	2,58 (4.º)	3,25 (3.º)
Asistida por RF	3,70 (1.º)	3,25 (3.º)	3,62 (2.º)
Put to Light	3,60 (2.º)	4,50 (1.º)	3,75 (1.º)
Clasificador automático	2,33 (5.º)	3,65 (2.º)	2,50 (5.º)

Fuente: Elaboración propia. ¹ Pesos: exactitud 15 %, escalabilidad 10 %, fragmentación 5 %, inversión 30 %, OPEX 20 %, flexibilidad 8 %, superficie 5 %, implementación 7 %. ² Pesos: exactitud 30 %, escalabilidad 25 %, fragmentación 20 %, inversión 8 %, OPEX 5 %, flexibilidad 5 %, superficie 3 %, implementación 4 %.

El resultado permite delimitar con mayor precisión la recomendación. Cuando la prioridad se desplaza de manera extrema hacia inversión y costo operacional, la alternativa RF pasa al primer lugar. En cambio, el PTL permanece primero bajo prioridad operacional y bajo ponderación uniforme. Por tanto, la preferencia por el PTL no es absoluta: depende de que la operación valore especialmente exactitud, capacidad de campaña y tolerancia a la llegada fraccionada, condiciones que el diagnóstico identifica como centrales en el caso estudiado.

7.6 Discusión de las alternativas

Clasificación manual posterior. Mantiene la menor inversión y una alta flexibilidad física, pero conserva las brechas que originan el proyecto: clasificación sin asistencia, dependencia del operario, baja trazabilidad y dificultad para escalar durante campañas.

Su permanencia solo resulta razonable cuando los volúmenes y exigencias de exactitud son bajos.

Clasificación durante la recolección. Puede eliminar parte del trabajo posterior, pero su ajuste al caso es limitado. La recolección por niveles y la llegada fraccionada de referencias dificultan mantener cada pedido separado durante el recorrido, y el tamaño del lote queda condicionado al número de compartimentos disponibles en el carro (de Koster et al., 2007; Boysen et al., 2019).

Clasificación asistida por radiofrecuencia. Constituye la alternativa de menor inversión tecnológica con mayor competitividad. Aprovecha infraestructura existente y reduce parte de la carga cognitiva, pero mantiene la necesidad de localizar físicamente la posición indicada en la pantalla. Por ello, resulta especialmente atractiva cuando el presupuesto domina la decisión y la exigencia de exactitud es menor.

Put to Light. Presenta el mejor ajuste al perfil del caso porque combina indicación física directa, confirmación de la operación, reutilización dinámica de posiciones y capacidad modular. Su desventaja relativa es una inversión superior a RF y una dependencia mayor de software e integración (Boysen et al., 2020; Mecalux, 2024).

Clasificador automático. Ofrece alta capacidad y exactitud, pero su inversión, superficie y complejidad son desproporcionadas frente al alcance del problema analizado. En el marco de esta tesina se interpreta como una alternativa de mayor automatización pertinente para volúmenes y condiciones físicas diferentes (Wulfraat, 2013).

7.7 Cierre

El análisis multicriterio sitúa al Put to Light como la alternativa de mejor ajuste bajo las prioridades derivadas del diagnóstico. El resultado es robusto frente a variaciones amplias de los pesos y frente a una ponderación uniforme, aunque la alternativa RF se vuelve preferible cuando la decisión privilegia de manera dominante la inversión inicial y el costo operacional.

La conclusión debe interpretarse de forma condicionada: el PTL es preferible para una operación con demanda altamente estacional, necesidad elevada de exactitud, llegada fraccionada de referencias y disponibilidad de una inversión de automatización intermedia. La comparación no demuestra superioridad universal de la tecnología, sino consistencia entre sus atributos y las restricciones específicas del caso.

8 Conclusiones

El presente capítulo sintetiza los resultados del trabajo y responde la pregunta de investigación a partir de la evidencia desarrollada en los capítulos precedentes. Las conclusiones se organizan según los objetivos específicos, distinguiendo entre resultados observados, supuestos de evaluación y limitaciones de la evidencia disponible. Esta distinción resulta especialmente relevante para la evaluación económica y para la interpretación del efecto esperado del PTL sobre los errores de despacho.

8.1 Conclusiones por objetivo específico

8.1.1 Primer objetivo: sistematizar el estado del arte y establecer criterios de selección tecnológica

La revisión permitió separar dos decisiones que suelen tratarse de manera conjunta: la política de preparación y la tecnología utilizada para ejecutar la clasificación. La operación estudiada ya empleaba preparación por lotes, por lo que la decisión relevante no consistía en reemplazar el método de recolección, sino en resolver la etapa posterior que transforma un flujo organizado por producto en un flujo organizado por pedido.

Esta distinción permitió delimitar correctamente el espacio de alternativas y atribuir los beneficios del Put to Light a la etapa sobre la cual actúa: clasificación, identificación del destino, confirmación de la depositación y consolidación. En particular, el sistema no reduce directamente la distancia recorrida durante el picking, dado que opera aguas abajo de dicha actividad. Los criterios establecidos en el estado del arte —exactitud, escalabilidad, tolerancia a la llegada fraccionada, inversión, costo operacional, flexibilidad, superficie y complejidad de implementación— fueron utilizados posteriormente para la comparación multicriterio.

8.1.2 Segundo objetivo: caracterizar el proceso actual, establecer la línea base y priorizar las brechas

El diagnóstico mostró que el problema central no podía explicarse únicamente por el volumen de trabajo. La preparación por lotes generaba una etapa de clasificación posterior que se ejecutaba manualmente y sin verificación sistemática. Esta condición se veía agravada por la recolección fraccionada entre niveles: referencias de una misma orden podían llegar a la estación en momentos y carros distintos, obligando a reconstruir manualmente la composición del pedido.

La línea base se construyó sobre una serie histórica de doce meses, presentada mediante volúmenes anonimizados que conservan la estructura y proporcionalidad de la operación. En esa escala, la demanda promedio corresponde a aproximadamente 795 órdenes por día operativo, con una composición de 25,2 % de órdenes multi-SKU que concentra cerca de 45 % de las líneas y unidades. La operación estima una tasa de error de despacho de 2 % a 3 % en régimen ordinario y de hasta 4 % durante campañas; este indicador se mantiene como estimación operacional y no como medición sistemática.

Las brechas de mayor prioridad se localizaron en el desacoplamiento documental, la clasificación manual sin asistencia, la ausencia de trazabilidad y la dependencia de reglas de trabajo ejecutadas fuera de los sistemas. El diagnóstico también identificó el traslado vertical como causa indirecta de fragmentación, pero no como la intervención principal del proyecto.

8.1.3 Tercer objetivo: diseñar y dimensionar la solución Put to Light

La solución se diseñó manteniendo la preparación por lotes y modificando la etapa de clasificación. El flujo objetivo permite que cada pedido avance y genere su documentación cuando queda completo, sin esperar el cierre del grupo de preparación. Los pedidos de una referencia y una unidad pueden transitar en flujo directo, mientras que

aquellos que requieren consolidación ocupan una posición persistente hasta completar sus unidades o referencias.

El dimensionamiento ex-ante condujo a una configuración inicial de ocho estaciones, estructurada como cinco estaciones disponibles en configuración regular y tres adicionales para períodos de alta demanda. Cada estación dispone de dieciséis posiciones con indicador luminoso y veinticuatro posiciones de buffer. La elección del número de estaciones se realizó sobre la condición de máximo histórico observada, mientras que el número de posiciones se estimó mediante la ley de Little y un supuesto ex-ante de tiempo de residencia.

La contribución del diseño no reside en proponer un percentil específico de dimensionamiento, sino en separar capacidad instalada y capacidad activada: una base permanente atiende la operación ordinaria y una capacidad modular absorbe los eventos de mayor intensidad. Esta arquitectura reduce el costo de mantener recursos activos durante todo el año sin renunciar a capacidad adicional durante campañas.

8.1.4 Cuarto objetivo: contrastar el dimensionamiento con el comportamiento observado

La implementación ocurrida durante el desarrollo del trabajo permitió contrastar el diseño con 98.333 confirmaciones unitarias registradas durante los primeros cuatro meses de operación. La estructura de la demanda se mantuvo estable: los parámetros de composición contrastados presentaron desviaciones inferiores a 3,6 % respecto de la caracterización histórica.

La configuración implementada coincidió con la arquitectura propuesta: cinco estaciones disponibles de manera permanente, ocho durante el período de mayor demanda y dieciséis posiciones con indicador por estación. Esta coincidencia, junto con la operación

observada, demuestra suficiencia para el período analizado; no demuestra por sí sola que ocho estaciones constituyan el número mínimo requerido.

El contraste identificó dos aprendizajes metodológicos relevantes. Primero, el tiempo de residencia de 25 minutos utilizado ex-ante resultó conservador frente a un valor implícito observado cercano a 8,5 minutos, debido al reuso intensivo de posiciones dentro de una misma ola. Segundo, la utilización operativa observada fue de 38,3 % bajo la definición basada en intervalos entre confirmaciones, lo que muestra una reserva importante de capacidad durante la ventana registrada.

El intervalo mediano entre confirmaciones fue de 11,3 segundos. Este indicador describe el ritmo observado de ejecución y no debe denominarse takt time. La combinación de un ritmo elevado durante períodos activos y una utilización operativa baja es consistente con un desplazamiento de la restricción hacia la alimentación de las estaciones, principalmente la secuenciación de olas y la llegada de trabajo desde picking.

8.1.5 Quinto objetivo: evaluar la viabilidad económica y contrastar alternativas tecnológicas

El escenario base considera una inversión inicial de 76,219 millones de pesos. Aplicando una tasa de descuento real anual de 12 % al flujo incremental antes de impuestos y expresado en pesos constantes, se obtiene un VAN de 161,110 millones de pesos, una TIR de 66,5 % y un período de recuperación descontado durante el segundo año. Estos resultados corresponden al escenario base definido en el Capítulo 6 y deben interpretarse junto con el análisis de sensibilidad, particularmente respecto del costo unitario del error, la reducción atribuible al PTL, la tasa de error inicial y el crecimiento de la demanda.

La composición del escenario base muestra que la reducción de errores representa aproximadamente 58,8 % del valor presente de los beneficios. Al excluir completamente

este componente, el VAN reconstruido desde el flujo publicado se reduce a aproximadamente -6,4 millones de pesos. Por ello, con los supuestos actuales, la exactitud no es solo el beneficio principal: constituye un componente determinante de la conveniencia económica.

Esta conclusión requiere una interpretación prudente. El Capítulo 5 no mide directamente la reducción postimplementación de errores de despacho. La reducción relativa de 84 % utilizada en el caso base es un supuesto de evaluación sustentado en referencias externas y sometido a sensibilidad. Del mismo modo, el costo unitario del error se sustenta en estimaciones y tarifas locales y, debido a la incertidumbre asociada a su magnitud, se incorpora como parámetro del análisis de sensibilidad.

El análisis multicriterio ubicó al Put to Light en primer lugar bajo la ponderación base, con 4,20 puntos, seguido por la clasificación asistida por radiofrecuencia con 3,40. La solución PTL permaneció primera en 1.000 variaciones aleatorias de los pesos y bajo ponderación uniforme, mientras que la alternativa RF pasó al primer lugar cuando la decisión se orientó deliberadamente hacia inversión y costo operacional. La conclusión tecnológica es, por tanto, condicionada: PTL presenta el mejor ajuste cuando exactitud, escalabilidad y tolerancia a la llegada fraccionada son las prioridades dominantes del caso.

8.2 Respuesta a la pregunta de investigación

La pregunta de investigación indagaba en qué medida la implementación de un sistema Put to Light en la etapa de clasificación y consolidación permite mejorar el desempeño operativo y la exactitud del proceso, y bajo qué condiciones de demanda, dimensionamiento e inversión resulta económicamente viable frente al proceso actual basado en preparación por lotes con clasificación manual.

La evidencia obtenida permite concluir que la implementación modifica favorablemente el funcionamiento de la etapa de clasificación por tres mecanismos. Primero, sustituye la identificación manual del destino por un sistema de guiado luminoso y confirmación positiva. Segundo, desacopla el avance de cada pedido del cierre del lote, permitiendo liberar la orden al completarse. Tercero, mantiene una posición persistente para pedidos incompletos, de modo que la llegada de referencias en distintos carros o momentos deja de requerir reconstrucción manual del pedido.

Desde el punto de vista de capacidad, la configuración modular de ocho estaciones resultó suficiente durante el período observado y permitió absorber un evento de alta intensidad. La validación mostró además que el sistema dispone de holgura relevante durante parte de la jornada; por ello, la siguiente oportunidad de mejora no parece requerir inicialmente más equipamiento, sino una mejor sincronización entre la liberación de olas, la recolección y la alimentación de las estaciones.

Respecto de la exactitud, el diseño incorpora mecanismos que reducen la exposición al error de clasificación, pero el estudio no dispone todavía de un registro postimplementación de errores de despacho que permita cuantificar empíricamente dicha reducción. Por ello, su efecto económico debe interpretarse mediante escenarios y sensibilidad, no como un porcentaje observado.

En términos económicos, el escenario base indica conveniencia bajo los supuestos considerados, pero dicha conclusión depende de condiciones verificables: crecimiento suficiente de la demanda, existencia de un costo significativo asociado al error, una proporción relevante de incidencias atribuible a la clasificación y una inversión y soporte compatibles con los valores analizados. La viabilidad no es, por tanto, incondicional. La solución resulta preferible para el perfil estudiado cuando la operación enfrenta alta estacionalidad, exige exactitud elevada y requiere absorber la llegada fraccionada de referencias sin incrementar proporcionalmente la complejidad manual.

8.3 Contribuciones del trabajo

8.3.1 Arquitectura de capacidad permanente y modular

El trabajo propone tratar la estacionalidad mediante una arquitectura que separa capacidad disponible de capacidad permanentemente activada. En lugar de definir toda la instalación a partir de la demanda promedio o mantener todos los recursos activos para el máximo anual, se configura una base regular y un componente adicional para campañas. La implementación observada respalda la factibilidad operacional de esta lógica.

8.3.2 Validación ex-post del procedimiento de dimensionamiento

La disponibilidad de registros posteriores a la implementación permitió examinar no solo si la configuración operó, sino también qué supuestos del dimensionamiento fueron representativos. La estabilidad de la composición de demanda y la suficiencia de la configuración contrastan con la sobrestimación del tiempo de residencia, generando un aprendizaje transferible para futuros diseños.

8.3.3 Integración del costo de la no calidad en la evaluación

El análisis económico muestra que la valoración de errores de despacho puede modificar de manera sustantiva la decisión de inversión. En el escenario base, eliminar el beneficio por exactitud vuelve negativo el VAN. Esto refuerza la necesidad de incorporar explícitamente el costo de la no calidad en la evaluación de tecnologías orientadas a clasificación y verificación, en lugar de limitar el análisis a ahorro de horas-hombre.

8.3.4 Identificación de una cadena causal entre infraestructura y clasificación

El diagnóstico permitió vincular una limitación física aguas arriba —el traslado vertical de carros— con una dificultad de clasificación aguas abajo. La solución no exige eliminar esa práctica, sino absorber sus efectos mediante asignación persistente de

posiciones. Esta orientación evita intervenir una conducta que responde a una restricción física real y convierte la fragmentación en una condición tolerada por el proceso objetivo.

8.4 Limitaciones

- El estudio corresponde a un caso único; la transferibilidad se sustenta en la estructura del problema y en el procedimiento utilizado, no en la generalización directa de sus valores numéricos.
- Los volúmenes operacionales presentados están transformados mediante un factor de escala no revelado para resguardar confidencialidad. Las proporciones y relaciones se conservan, mientras que la evaluación económica debe realizarse sobre la escala real.
- La validación postimplementación cubre cuatro meses y una implementación única. El período incluye un evento de alta intensidad, pero no un ciclo anual completo.
- La tasa de error de despacho previa corresponde a una estimación operacional y no existe todavía una medición postimplementación sistemática que permita cuantificar la reducción atribuible al PTL.
- El costo unitario del error se sustenta en estimaciones y tarifas locales y, por tanto, constituye una fuente de incertidumbre económica considerada mediante análisis de sensibilidad.
- La capacidad máxima del escenario sin proyecto no fue demostrada de manera independiente; por ello, las proyecciones de dotación evitada dependen del supuesto de capacidad adoptado y deben interpretarse conjuntamente con el análisis de sensibilidad.
- Los indicadores financieros se obtienen de un flujo incremental antes de impuestos, expresado en pesos constantes y descontado a una tasa real anual de 12 %. La tasa se utiliza como parámetro del escenario base y no como una estimación del costo de capital específico de la empresa; en consecuencia, los resultados deben interpretarse dentro de los supuestos económicos y rangos de sensibilidad definidos en el Capítulo 6.
- La coincidencia entre configuración diseñada e implementada demuestra suficiencia bajo las condiciones observadas, pero no minimalidad del número de estaciones.
- El análisis multicriterio depende de juicios de ponderación y puntuación. La sensibilidad sobre pesos reduce, pero no elimina, esta fuente de subjetividad.

8.5 Recomendaciones y trabajo futuro

8.5.1 Para la operación

La principal oportunidad identificada después de la implementación se relaciona con el aprovechamiento de la capacidad instalada. Bajo la definición empleada, las estaciones registran 38,3 % de utilización operativa. Antes de incorporar nuevo equipamiento, se recomienda revisar la secuenciación de olas, la sincronización con picking y el balance de carga entre estaciones. Si el rendimiento durante tiempo efectivo se mantuviera, una mayor continuidad de alimentación podría incrementar de forma importante el throughput sin inversión adicional, aunque este potencial debe validarse evitando trasladar la restricción hacia empaque.

También se recomienda implementar un registro estructurado de errores de despacho clasificado por causa y etapa de origen. Esta información permitiría sustituir el supuesto económico de reducción de errores por evidencia real, además de identificar si las incidencias remanentes provienen de picking, clasificación, inventario, etiquetado o despacho.

Finalmente, conviene monitorear la utilización y ocupación de posiciones por estación durante nuevas campañas. Esto permitirá determinar si ocho estaciones siguen siendo suficientes frente al crecimiento y establecer el momento efectivo en que una ampliación modular resulta necesaria.

8.5.2 Para trabajo futuro

- Verificar empíricamente el mínimo estimado en el contraste de configuraciones de la Tabla 4.5, operando con un número reducido de estaciones activas durante una condición de demanda equivalente y registrando el desempeño resultante.

- Modelar la secuenciación de olas incorporando afinidad de zona, canal de despacho y ventanas de corte, con el objetivo de aumentar la continuidad de alimentación del PTL.
- Extender la validación a un ciclo anual completo y contrastar la tasa real de errores de despacho antes y después de la implementación.
- Evaluar operaciones con mayor profundidad de pedido, donde el número de posiciones y el tiempo de residencia puedan convertirse en la restricción dominante.
- Actualizar la evaluación económica con los parámetros reales definitivos y cuantificar, cuando exista información, beneficios asociados al cumplimiento de nivel de servicio y a penalizaciones o ventas perdidas.
- Analizar la etapa de empaque como posible restricción futura una vez mejorada la alimentación de las estaciones.

8.6 Síntesis de resultados

La Tabla 8.1 sintetiza los resultados obtenidos en cada dimensión evaluada.

Tabla 8.1: Síntesis de resultados por dimensión.

Dimensión	Resultado	Interpretación / estado
Configuración inicial propuesta	8 estaciones: 5 de configuración regular + 3 de campaña; 16 posiciones con indicador y 24 de buffer por estación	Suficiente durante el período observado; corresponde al mínimo analítico según el criterio de utilización adoptado en la Tabla 4.5, sin verificación empírica de minimalidad.
Estabilidad de la demanda	Desviaciones inferiores a 3,6 % en los parámetros contrastados	Respalda la caracterización histórica utilizada.
Tiempo de residencia	25 min ex-ante vs. $\approx$ 8,5 min implícitos observados	El supuesto fue conservador; futuros diseños deben considerar reuso de posiciones.
Ritmo observado	Intervalo mediano entre confirmaciones: 11,3 s	No corresponde denominarlo takt time.
Utilización operativa observada	38,3 %	Evidencia de holgura y oportunidad de mejorar alimentación.
Evaluación económica escenario base	VAN 161,1 MM CLP; TIR 66,5 %; payback durante año 2	Resultado condicionado a los supuestos y análisis de sensibilidad del Capítulo 6.
Participación de exactitud	58,8 % del valor presente de beneficios en el escenario base	Sin beneficio por errores, VAN reconstruido $\approx$ -6,4 MM CLP.
Alternativa preferida	Put to Light: 4,20 puntos; RF: 3,40	PTL primero en ponderación base y uniforme; RF primero bajo prioridad económica extrema.

Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, la solución Put to Light presenta un ajuste técnico y operativo favorable para el problema estudiado y mostró suficiencia durante el período de validación. La evidencia posterior a la implementación confirma la utilidad de la arquitectura modular y revela una oportunidad adicional en la alimentación de las estaciones. La conveniencia económica del proyecto es positiva bajo el escenario base, aunque depende de parámetros sujetos a incertidumbre, especialmente el costo de los errores, la reducción atribuible al sistema, el crecimiento de la demanda y la evolución de la capacidad requerida. Por esta razón, la conclusión distingue entre los resultados observados de operación y los supuestos utilizados para valorar económicamente sus beneficios.

Referencias Bibliográficas

- Belton, V., & Stewart, T. J. (2002). *Multiple criteria decision analysis: An integrated approach*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1495-4>
- Bernon, M., Rossi, S., & Cullen, J. (2011). Retail reverse logistics: A call and grounding framework for research. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41(5), 484–510. <https://doi.org/10.1108/09600031111138835>
- Boysen, N., de Koster, R., & Weidinger, F. (2019). Warehousing in the e-commerce era: A survey. *European Journal of Operational Research*, 277(2), 396–411. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.023>
- Boysen, N., Füßler, D., & Stephan, K. (2020). See the light: Optimization of put-to-light order picking systems. *Naval Research Logistics*, 67(1), 3–20. <https://doi.org/10.1002/nav.21883>
- Casella, G., Volpi, A., Montanari, R., Tebaldi, L., & Bottani, E. (2023). Trends in order picking: A 2007–2022 review of the literature. *Production & Manufacturing Research*, 11(1), 2191115. <https://doi.org/10.1080/21693277.2023.2191115>
- de Koster, R., Le-Duc, T., & Roodbergen, K. J. (2007). Design and control of warehouse order picking: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 481–501. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>
- Freivalds, A., & Niebel, B. W. (2014). *Niebel's methods, standards, & work design* (13th ed.). McGraw-Hill Education.
- Füßler, D., & Boysen, N. (2017). Efficient order processing in an inverse order picking system. *Computers & Operations Research*, 88, 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.07.005>
- Gu, J., Goetschalckx, M., & McGinnis, L. F. (2007). Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research*, 177(1), 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.025>
- Hopp, W. J., & Spearman, M. L. (2008). *Factory physics* (3rd ed.). McGraw-Hill/Irwin.
- Ley N.º 20.949. Modifica el Código del Trabajo para reducir el peso de las cargas de manipulación manual. Diario Oficial de la República de Chile, 17 de septiembre de 2016. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1094899>
- Ley N.º 21.561. Modifica el Código del Trabajo con el objeto de reducir la jornada laboral. Diario Oficial de la República de Chile, 26 de abril de 2023. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1191554>

- Little, J. D. C. (1961). A proof for the queuing formula: $L = \lambda W$. *Operations Research*, 9(3), 383–387. <https://doi.org/10.1287/opre.9.3.383>
- Łopuszyński, M., Janusz, K., & Karwat, D. (2025). Comparative study of selected order-picking methods: Efficiency, ergonomics, and adaptation rate of new employees. *Sensors*, 25(3), 923. <https://doi.org/10.3390/s25030923>
- Marasco, A. (2008). Third-party logistics: A literature review. *International Journal of Production Economics*, 113(1), 127–147. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.05.017>
- Mecalux. (2024, 31 de diciembre). *Put-to-light: Picking hacia la ubicación luminosa*. <https://www.mecalux.cl/blog/put-to-light>
- Ministerio de Salud de Chile. (2024). *Protocolo de vigilancia ocupacional por exposición a factores de riesgo de trastornos musculoesqueléticos (V2)*. <https://www.minsal.cl/salud-ocupacional/>
- Pinto, A. R. F., Nagano, M. S., & Boz, E. (2023). A classification approach to order picking systems and policies: Integrating automation and optimization for future research. *Results in Control and Optimization*, 12, 100281. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2023.100281>
- Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. (2001). An examination of reverse logistics practices. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 129–148. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00007.x>
- Sapag Chain, N., Sapag Chain, R., & Sapag Puelma, J. M. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, 7(1), 12–24. <https://doi.org/10.1057/jos.2012.20>
- Wulfraat, M. (2013). *Distribution center order picking technologies compared*. MWPVL International Inc. https://www.mwpvl.com/html/order_pick_technologies.html