



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA
INDOAMÉRICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL CON MENCIÓN EN
LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTROS**

TEMA:

**OPTIMIZACIÓN DEL INVENTARIO DE REPUESTOS EN TALLER DE EQUIPO
PESADO MEDIANTE MODELOS DE GESTIÓN Y HERRAMIENTAS
TECNOLÓGICAS**

Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de Magíster en Ingeniería Industrial con
mención en logística y cadena de suministros

Autor

Ing. Duche Huilca Carlos Ismael

Tutora

Mgtr. Álvarez Sánchez Ana

QUITO– ECUADOR

2026

**AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA,
REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL
TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Carlos Ismael Duche Huilca declaro ser autor del Trabajo de Titulación con el nombre “OPTIMIZACIÓN DEL INVENTARIO DE REPUESTOS EN TALLER DE EQUIPO PESADO MEDIANTE MODELOS DE GESTIÓN Y HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS”, como requisito para optar al grado de Magíster en Ingeniería Industrial y autorizo al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Indoamérica, para que con fines netamente académicos divulgue esta obra a través del Repositorio Digital Institucional (RDI-UTI).

Los usuarios del RDI-UTI podrán consultar el contenido de este trabajo en las redes de información del país y del exterior, con las cuales la Universidad tenga convenios. La Universidad Indoamérica no se hace responsable por el plagio o copia del contenido parcial o total de este trabajo.

Del mismo modo, acepto que los Derechos de Autor, Morales y Patrimoniales, sobre esta obra, serán compartidos entre mi persona y la Universidad Indoamérica, y que no tramitaré la publicación de esta obra en ningún otro medio, sin autorización expresa de la misma. En caso de que exista el potencial de generación de beneficios económicos o patentes, producto de este trabajo, acepto que se deberán firmar convenios específicos adicionales, donde se acuerden los términos de adjudicación de dichos beneficios.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Quito a los 14 días del mes de mayo de 2026, firmo conforme:

Autor: Carlos Ismael Duche Huilca

Firma:

Número de Cédula: 1711096667

Dirección: Pichincha, Quito, Calderón, Carapungo.

Correo Electrónico: carlosducheismael@hotmail.com

Teléfono: 0988921041

APROBACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de Directora del Trabajo de Titulación “OPTIMIZACIÓN DEL INVENTARIO DE REPUESTOS EN TALLER DE EQUIPO PESADO MEDIANTE MODELOS DE GESTIÓN Y HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS” presentado por Carlos Ismael Duche Huilca para optar por el Título Magíster en Ingeniería Industrial con mención en logística y cadena de suministros.

CERTIFICO

Que dicho Trabajo de Titulación ha sido revisado en todas sus partes y considero que reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte los Examinadores que se designe.

Quito, 14 de mayo del 2026.

.....

Mgtr. Álvarez Sánchez Ana

DIRECTORA

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Quien suscribe, declaro que los contenidos y los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación, como requerimiento previo para la obtención del Título de Magíster en Ingeniería Industrial con mención en logística y cadena de suministros, son absolutamente originales, auténticos y personales y de exclusiva responsabilidad legal y académica del autor

Quito, 14 de mayo del 2026.

.....

Carlos Ismael Duche Huilca

1711096667

APROBACIÓN DE EXAMINADORES

El Trabajo de Titulación ha sido revisado, aprobado y autorizada su impresión y empastado, sobre el Tema: “OPTIMIZACIÓN DEL INVENTARIO DE REPUESTOS EN TALLER DE EQUIPO PESADO MEDIANTE MODELOS DE GESTIÓN Y HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS”, previo a la obtención del Título de Magíster en Ingeniería Industrial con mención en logística y cadena de suministros, reúne los requisitos de fondo y forma para que el estudiante pueda presentarse a la sustentación del Trabajo de Titulación.

Quito, 14 de mayo del 2026.

CACERES MIRANDA LORENA ELIZABETH

EXAMINADOR

POZO ESPIN ISRAEL ALEJANDRO

EXAMINADOR

DEDICATORIA

A mi familia, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional durante cada etapa de este proceso de formación académica. Su respaldo constante, sus palabras de aliento en los momentos de mayor exigencia y su capacidad para entender las ausencias que demandó este camino fueron el pilar fundamental que hizo posible alcanzar esta meta.

A quienes, con su ejemplo de perseverancia y disciplina, me enseñaron que el esfuerzo sostenido es el único camino hacia los logros que trascienden. Este trabajo es reflejo de ese principio y representa un compromiso renovado con el crecimiento profesional y personal.

Carlos Ismael

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Tecnológica Indoamérica, por brindar un entorno académico orientado a la excelencia profesional y por proporcionar los recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

A mi tutora, Mgtr. Ana Álvarez Sánchez, por su guía, rigurosidad y acompañamiento constante en cada fase de este trabajo. Su orientación metodológica y sus observaciones críticas fueron determinantes para alcanzar los resultados obtenidos.

A la empresa HIDRO S.A., por facilitar el acceso a la información, los recursos y el espacio operativo necesarios para la ejecución del proyecto. La disposición del equipo de mantenimiento y de bodega hizo posible la implementación del sistema propuesto.

A mis compañeros de maestría, por el intercambio de conocimientos y experiencias que enriquecieron este proceso formativo.

Gracias

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA	i
AUTORIZACIÓN PARA EL REPOSITORIO DIGITAL.....	ii
APROBACIÓN DEL DIRECTOR.....	iii
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD.....	iv
APROBACIÓN DE EXAMINADORES	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
RESUMEN EJECUTIVO	xix
ABSTRACT.....	xx

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

Introducción	1
Antecedentes	7
Justificación	9
Objetivos.....	11
Objetivo General.....	11
Objetivos Específicos.....	11

CAPÍTULO II

INGENIERÍA DEL PROYECTO

Diagnóstico de la situación actual de la empresa (HIDRO S.A.)	13
Proceso actual mantenimiento–bodega–compras (AS-IS).....	13
Evidencia documental del problema (síntomas medibles).....	15

Caracterización cuantitativa del inventario actual (línea base).....	17
Indicadores base del inventario.....	20
Análisis de causa raíz del desempeño del inventario.....	22
Brechas técnicas del proceso actual frente al sistema requerido	26
Hallazgos y requerimientos del sistema.....	28
Área de estudio	30
Modelo operativo	31
Modelo operativo actual (AS-IS).....	31
Modelo operativo propuesto (TO-BE) del sistema de inventarios	34
Flujo de información mantenimiento → inventario → compras (trazabilidad)	35
Requerimientos funcionales para GMAO/CMMS.....	38
Desarrollo del modelo operativo.....	40
Entrada del sistema	43
Fase 1: Depuración y normalización del catálogo	44
Actividad 1: Eliminación de duplicidades	44
Actividad 2: Estandarización de códigos.....	45
Actividad 3: Homologación de descripciones	45
Actividad 4: Consolidación del maestro de repuestos	46
Salida (Catálogo técnico normalizado de 60 ítems activos con trazabilidad completa).....	46
Fase 2 – Clasificación estratégica ABC-XYZ	48
Actividades de clasificación ABC-XYZ.....	49
Actividad 1: Cálculo del consumo anual valorizado	49
Actividad 2: Determinación del porcentaje acumulado.....	49
Actividad 3: Clasificación ABC por valor económico.	50
Actividad 4: Cálculo del coeficiente de variación	51
Actividad 5: Clasificación XYZ por variabilidad de demanda.....	52

Salida: Matriz ABC-XYZ segmentada con políticas diferenciadas	53
Fase 3 – Priorización por criticidad (NPR).....	56
Actividades de priorización por NPR	57
Actividad 1: Aplicación de AMEF/FMECA	57
Actividad 2: Determinación de Severidad (S)	57
Actividad 3: Determinación de Ocurrencia (O).....	57
Actividad 4: Determinación de Detectabilidad (D)	58
Actividad 5: Cálculo del NPR y asignación de prioridad	58
Resultados de la clasificación por criticidad NPR	60
Identificación de ítems de mayor criticidad y análisis de componentes del NPR ...	62
Salida: Matriz combinada ABC-NPR con políticas diferenciadas	65
Asignación de niveles de servicio por segmento combinado	68
Fase 4: Modelo probabilístico de reposición	69
Actividades de parametrización estocástica (SS y ROP).....	69
Actividad 1: Cálculo de la demanda promedio.....	69
Actividad 2: Determinación de la desviación estándar.....	70
Actividad 3: Cálculo del stock de seguridad (SS)	70
Actividad 4: Cálculo del punto de reorden (ROP).....	71
Actividad 5: Definición del nivel de servicio por segmento.....	72
SALIDA.....	72
Parámetros óptimos de inventario por ítem	72
Distribución agregada por segmento ABC–NPR	73
Fase 5 – Parametrización de políticas de inventario.....	75
Actividades de implementación operativa.....	75
Actividad 1: Asignación de Política Diferenciada por Segmento	75
Actividad 2: Definición de revisión periódica o continua	77
Actividad 3: Establecimiento de reglas de control	78

Salida: Matriz de políticas operativas	79
Fase 6 – Diseño e integración GMAO/CMMS.....	82
Actividad 1: Configuración del Catalogo Digital MRO	83
Actividad 2: Requerimientos funcionales del sistema GMAO/CMMS.....	84
Actividad 3: Parametrización SS y ROP por Ítem.....	86
Actividad 4: Configuración de Alertas Automáticas	88
Actividad 5: Integración Inventario, Mantenimiento y Compras	89
Salida: Sistema automatizado con trazabilidad completa.....	91
Fase 7 – Generación de indicadores en tiempo real.....	92
Actividad 1: Configuración del Dashboard de Control	94
Actividad 2: Nivel de Servicio y Tasa de Quiebre	96
Actividad 3: Rotación de Inventario y Capital Inmovilizado	98
Actividad 4: Lead Time de Reposición y Obsolescencia	99
Actividad 5: Horas Perdidas por Faltantes y Semáforo de Control	101
Actividad 6: Resultados consolidados del sistema de control operacional digital	103

CAPÍTULO III

PROPUESTA Y RESULTADOS ESPERADOS

Cronograma de actividades para la aplicación de la propuesta	116
Análisis de costos de implementación	121
Cronograma valorado de componentes y actividades.....	122
Curva S del proyecto.....	125

CAPÍTULO IV

PROCESO DE EJECUCIÓN

Justificación de la ejecución	127
Desarrollo y seguimiento	127
Resultados obtenidos	129
Resultado 1: Segmentación ABC (parametrización del catálogo).....	130

Resultado 2: Matriz ABC-XYZ (caracterización de la demanda)	132
Resultado 3: Criticidad NPR (priorización operacional)	135
Resultado modelado de la parametrización SS/ROP	139
Resultado 4: Integración GMAO/CMMS habilitada (automatización y trazabilidad).....	139
Ejecución del componente GMAO/CMMS.....	141
Resultados modelados/simulados	142
Resultados medidos del escenario TO-BE.....	143
Análisis estadístico descriptivo de la mejora	143
Análisis comparativo de indicadores de desempeño: AS-IS vs. TO-BE	143
Evidencia descriptiva de mejora y limitaciones de inferencia.....	147
Evaluación de la ejecución.....	148
Análisis comparativo de la situación inicial (AS-IS) vs. situación posterior (TO-BE).....	148
Evaluación económica	151
Resultados económicos medidos de la implementación.....	151
Cuantificación de Beneficios Económicos Anuales	151
Comparación de Costos: Situación AS-IS vs. TO-BE.....	152
Resultados económicos proyectados del modelo.....	153
Evaluación de Rentabilidad	153
Análisis de sensibilidad.....	154
Análisis de la curva S del proyecto.....	154
Cumplimiento de objetivos específicos	155

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones	158
Limitaciones del estudio	159
Líneas de investigación futura	159

Recomendaciones	159
Referencias.....	161

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales estándares internacionales en gestión de activos e inventarios.....	3
Tabla 2 Comparación de lead times de respuestas: Ecuador vs. Región.	6
Tabla 3 Justificación de la selección de herramientas metodológicas.	12
Tabla 4 Puntos de decisión del AS-IS y datos mínimos a registrar para trazabilidad y modelación.....	14
Tabla 5 Eventos documentados de quiebres, reprogramaciones y demoras.	16
Tabla 6 Línea base documental de repuestos y consumibles (XC8-C2570): estructura mínima del maestro MRO.....	17
Tabla 7 Extracto de consumos y costo anual de consumibles tipo filtros (Inventario H).....	19
Tabla 8 Datos mínimos para cerrar la línea base cuantitativa del inventario (variables del modelo y fuente interna).	20
Tabla 9 Indicadores base propuestos (fórmula, unidad, periodicidad y fuente).	20
Tabla 10 Línea base AS-IS con referencia cruzada a metas TO-BE.	22
Tabla 11 Brechas técnicas del AS-IS (HIDRO S.A.) frente al sistema requerido.....	27
Tabla 12: Requerimientos técnicos del sistema propuesto derivados del diagnóstico en HIDRO S.A.	29
Tabla 13 Área de estudio.	31
Tabla 14 Puntos críticos del AS-IS y riesgo operativo asociado.	34
Tabla 15 Nomenclatura de variables del flujo de trazabilidad OT–inventario–compras.	36
Tabla 16 Matriz mínima de captura de datos para trazabilidad OT–inventario–compras.	38
Tabla 17 Requerimientos funcionales mínimos del GMAO/CMMS para inventarios MRO.	39
Tabla 18 Resumen de la base cuantitativa de inventario (línea base).....	41
Tabla 19 Base histórica validada de la entrada del sistema (campos mínimos).	43
Tabla 20 Duplicados identificados y acciones de consolidación.....	45
Tabla 21 Muestra de 15 ítems representativos del catálogo completo de 60 ítems.	47
Tabla 22 Notación y variables para la clasificación ABC-XYZ.....	49
Tabla 23 Resultado agregado de clasificación XYZ.....	50
Tabla 24 Resultado agregado de clasificación XYZ.....	52
Tabla 25 Matriz ABC-XYZ (celda = N ítems / % valor anual).....	54
Tabla 26 Escalas operativas para la evaluación de criticidad NPR.	57
Tabla 27: Resultado agregado de clasificación por prioridad NPR.....	61
Tabla 28 Ítems de mayor criticidad (Top 10 por NPR).	63

Tabla 29 Matriz ABC-NPR (número de ítems / porcentaje del valor anual).....	65
Tabla 30 Parámetros de reposición para los 15 ítems de mayor ROP valorizado.	72
Tabla 31 Distribución agregada de parámetros SS y ROP por segmento ABC-NPR.	74
Tabla 32 Matriz de asignación de políticas por segmento ABC-NPR.....	76
Tabla 33 Reglas de control por tipo de política de revisión.....	78
Tabla 34 Matriz de Políticas Operativas – 60 ítems (T = período revisión periódica; Q = cantidad pedido continuo; S = nivel objetivo periódico).	79
Tabla 35 Resumen de actividades, responsables y Horas-Hombre de la Fase 6.	83
Tabla 36 Requerimientos funcionales mínimos del GMAO/CMMS para inventarios MRO.	85
Tabla 37 Parámetros de control configurados en el GMAO – 13 ítems Clase A, Política Continua (R, Q).....	87
Tabla 38 Resultados cuantificados del modelo TO-BE (mes 1 post implementación vs. diagnostico AS-IS).....	91
Tabla 39 Indicadores del sistema de control operacional digital – formulas, periodicidad y fuente de datos.	93
Tabla 40 Metas diferenciadas de NS, TQ y rotación por segmento ABC-NPR y criterio de control del dashboard.	95
Tabla 41 Semáforo de control operacional del sistema GMAO/CMMS – estado del Mes 1 TO-BE con umbrales y diagnóstico.....	102
Tabla 42 Comparativo de evaluación: indicadores de desempeño AS-IS vs TO-BE, Mes 1 post implementación.....	103
Tabla 43 Supuestos del modelo, impacto y mitigación.	107
Tabla 44 Entregables tangibles de la propuesta de optimización.	109
Tabla 45 Indicadores y metas esperadas de la propuesta de optimización.	111
Tabla 46 Cronograma detallado de actividades para la aplicación de la propuesta.....	117
Tabla 47 Cronograma detallado de actividades para la aplicación de la propuesta.....	120
Tabla 48 Cronograma valorado - Costos de recursos humanos por actividad y rol.	122
Tabla 49 Costos tecnológicos directos y de capacitación.	123
Tabla 50 Consolidado de costos de implementación - Año 1.....	124
Tabla 51 Proceso de ejecución del modelo.	128
Tabla 52 Clasificación de resultados por tipo y verificabilidad.....	129
Tabla 53 Resultado agregado de clasificación ABC (ejecución del modelo).....	130
Tabla 54 Matriz ABC-XYZ (celda = N ítems / % valor anual del catálogo total).	133
Tabla 55 Resultado agregado de clasificación por prioridad NPR (ejecución del modelo).	136

Tabla 56 Evidencias de habilitación del componente GMAO/CMMS.....	140
Tabla 57 Evidencia de ejecución del componente GMAO/CMMS.....	142
Tabla 58 Comparativo de evaluación - Indicadores de desempeño AS-IS vs TO-BE.	144
Tabla 59 Comparativo de capacidades estructurales del sistema de gestión AS-IS vs. TO-BE.	149
Tabla 60 Beneficios Económicos Anuales del Proyecto.	151
Tabla 61 Comparación de Estructura de Costos AS-IS vs. TO-BE.....	152
Tabla 62 Indicadores de Rentabilidad del Proyecto.....	153
Tabla 63 Análisis de Sensibilidad del ROI a 3 años.....	154
Tabla 64 Curva S – HH planificadas vs HH reales (baseline vs ejecución).	155
Tabla 65 Trazabilidad objetivos – indicadores – resultados obtenidos.	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tendencias globales en gestión de activos de construcción.....	4
Figura 2 Importaciones de maquinaria pesada.	5
Figura 3 Diagrama AS-IS del flujo real de repuestos.....	14
Figura 4 Diagrama Ishikawa (causas) del proceso de mantenimiento.....	24
Figura 5 Árbol de problemas (causas–problema–efectos).....	26
Figura 6 Diagrama de red AS-IS (componentes y flujos reales del repuesto).....	33
Figura 7 Arquitectura del proceso TO-BE.....	35
Figura 8 Flujo de información trazable.....	36
Figura 9 Mapa funcional CMMS–Inventario–Compras.....	40
Figura 10 Flujo general del desarrollo del modelo operativo.....	42
Figura 11 Flujo de depuración y normalización del catálogo MRO de HIDRO S.A.....	48
Figura 12 Curva ABC del análisis de Pareto del inventario.....	51
Figura 13 Distribución de ítems por clase.	51
Figura 14 Distribución de ítems por clase XYZ.....	53
Figura 15 Distribución del coeficiente de variación y clasificación XYZ.	53
Figura 16 Matriz ABC-XYZ, número de ítems por segmento.	54
Figura 17 Flujo de clasificación ABC-XYZ.....	55
Figura 18 Flujo de cálculo NPR y asignación de prioridad de riesgo.	59
Figura 19 Distribución de criticidad por NPR del catálogo completo.....	60
Figura 20 Distribución de ítems y valor por prioridad NPR.....	62
Figura 21 Componentes del NPR para los 15 ítems de mayor criticidad.	63
Figura 22: Matriz ABC-NPR: mapa de calor por número de ítems.	65
Figura 23 Relación entre valor anual y criticidad NPR.....	67
Figura 24 Distribución del stock de seguridad y punto de reorden por segmento ABC-NPR.	74
Figura 25 Análisis comparativo de parámetros de reposición por clasificación.	75
Figura 26 Matriz de políticas por segmento ABC–NPR (mapa de calor).	76
Figura 27 Distribución de políticas de inventario por clase ABC y prioridad NPR.....	77
Figura 28 Comparación de demanda y parámetros promedio por tipo de política.....	79
Figura 29 Cobertura de Requerimientos Funcionales RF-01 a RF-09 por módulo GMAO/CMMS.	86

Figura 30 Configuración de alertas automáticas ROP/SS: parámetros de inventario por ítem Clase A (izquierda) y relación SS vs. cantidad de pedido Q (derecha).	88
Figura 31 Flujo de integración trazable TO-BE: Mantenimiento → Inventario / Bodega → Compras, con GMAO/CMMS como núcleo de integración.....	89
Figura 32 Cronograma de implementación GMAO/CMMS: 7 actividades en 8 semanas, 162 HH totales, con hitos de validación y ruta crítica.	90
Figura 33 Distribución de Horas-Hombre por rol y actividad, Implementación GMAO/CMMS (162 HH totales).....	90
Figura 34 Dashboard de Indicadores en Tiempo Real – Mes 1 TO-BE. Los seis KPIs principales muestran valor actual, referencia AS-IS, meta configurada y mejora absoluta respecto al diagnóstico.	95
Figura 35 Evolución mensual del Nivel de Servicio (NS) y la Tasa de Quiebre (TQ).	96
Figura 36 Nivel de Servicio (NS) por segmento ABC-NPR: comparación AS-IS, TO-BE (Mes 1) y meta diferenciada por prioridad.....	97
Figura 37 Rotación de inventario por clase ABC (izquierda) y evolución del capital inmovilizado en USD (derecha).....	98
Figura 38 Lead Time de reposición por proveedor (AS-IS estimado, TO-BE Mes 1 y meta) e índice de obsolescencia por clase ABC (composición activo/obsoleto en el AS-IS y TO-BE).....	100
Figura 39 Horas perdidas por faltantes de repuestos (AS-IS vs TO-BE, izquierda) y semáforo de control operacional del sistema GMAO/CMMS para los siete indicadores del Mes 1 TO-BE (derecha).....	102
Figura 40 Diagrama de red de implementación de la propuesta.....	108
Figura 41 Diagrama de Gantt del cronograma de implementación.....	120
Figura 42 Curva S - Avance acumulado del proyecto de implementación.....	126
Figura 43 Distribución del valor anual por clase ABC - Gráfico de barras y curva de Pareto.	132
Figura 44 Matriz ABC-XYZ - Conteo de ítems (izquierda) y concentración de valor (derecha).	134
Figura 45 Distribución del Valor por Prioridad NPR.....	138
Figura 46 Comparativo AS-IS vs TO-BE de Indicadores.....	147

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL CON MENCIÓN EN
LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTROS

TEMA: OPTIMIZACIÓN DEL INVENTARIO DE REPUESTOS EN TALLER DE EQUIPO PESADO MEDIANTE MODELOS DE GESTIÓN Y HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS

AUTOR: Ing. Duche Huilca Carlos Ismael

TUTORA: Mgtr. Álvarez Sánchez Ana

RESUMEN EJECUTIVO

Los talleres de mantenimiento de equipo pesado enfrentan desafíos en la gestión de inventarios de repuestos MRO que impactan la continuidad operativa y eficiencia del mantenimiento preventivo. El taller de equipo pesado de HIDRO S.A. presentaba nivel de servicio del 72,3%, tasa de quiebre del 27,7%, trazabilidad deficiente del 34,2%, y demoras de 44,7 horas mensuales por faltantes, generando costos evitables de \$41.337 anuales. Para optimizar esta situación se diseñó un sistema integrado mediante clasificación ABC-XYZ para identificar repuestos estratégicos, priorización por criticidad NPR, parametrización estocástica de stock de seguridad y punto de reorden para los 24 ítems Clase A, e integración GMAO/CMMS para trazabilidad en tiempo real. La ejecución durante 8 semanas generó mejoras cuantificables y operativamente relevantes, el nivel de servicio aumentó a 94,8%, la tasa de quiebre se redujo a 5,2%, la rotación mejoró a 4,21 veces/año, las horas perdidas disminuyeron a 7,8 h/mes y la trazabilidad alcanzó el 100%. El análisis descriptivo muestra una mejora consistente del desempeño del sistema durante el período de observación del escenario TO-BE. La evaluación económica demuestra viabilidad extraordinaria con ROI 580% a tres años, payback 3,6 meses y VPN \$132.140 a cinco años. Se concluye que el modelo integrado ABC-XYZ-NPR con parametrización estocástica y trazabilidad GMAO transforma el sistema de reactivo a preventivo, optimizando la disponibilidad de repuestos y reduciendo quiebres de stock y demoras del mantenimiento preventivo, estableciendo una solución técnicamente fundamentada y económicamente viable para gestión de inventarios MRO en contextos industriales.

DESCRIPTORES: Inventario MRO, Clasificación ABC-XYZ, Criticidad NPR, Stock de Seguridad, GMAO/CMMS, Nivel de Servicio.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA INDOAMÉRICA

FACULTY OF ENGINEERING

Master's Degree in Industrial Engineering with major in Logistics and Supply Chain

AUTHOR: DUCHE HUILCA CARLOS ISMAEL

TUTOR: MSc. ALVAREZ SANCHEZ ANA

THEME

**OPTIMIZING SPARE PARTS INVENTORY IN HEAVY EQUIPMENT REPAIR WORKSHOPS
USING MANAGEMENT MODELS AND TECHNOLOGICAL TOOLS**

ABSTRACT

Heavy equipment maintenance workshops face challenges in managing MRO spare parts inventories that impact operational continuity and the efficiency of preventive maintenance. The HIDRO S.A. heavy equipment workshop had a service level of 72.3%, a stockout rate of 27.7%, a poor traceability rate of 34.2%, and monthly delays of 44.7 hours due to shortages, resulting in avoidable costs of \$41,337 annually. To optimize this situation, an integrated system was designed using ABC-XYZ classification to identify strategic spare parts, prioritize by NPR criticality, and stochastically parameterize safety stock and reorder points for the 24 Class A items, and integrate with GMAO/CMMS for real-time traceability. The 8-week implementation yielded measurable and operationally significant improvements: the service level increased to 94.8%, the breakage rate decreased to 5.2%, inventory turnover improved to 4.21 times per year, lost hours decreased to 7.8 hours per month, and traceability reached 100%. The descriptive analysis shows a consistent improvement in system performance during the observation period of the TO-BE scenario. The economic analysis demonstrates exceptional viability, with a 580% ROI over three years, a payback period of 3.6 months, and a net present value of \$132,140 over five years. In conclusion, the integrated ABC-XYZ-NPR model with stochastic parameterization and GMAO traceability transforms the system from reactive to preventive, optimizing spare parts availability and reducing stockouts and preventive maintenance delays, establishing a technically sound and economically viable solution for MRO inventory management in industrial settings.

KEYWORDS: ABC-XYZ classification, GMAO/CMMS, MRO inventory, NPR criticality, safety stock, service level



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Introducción

La gestión de activos físicos es reconocida a nivel internacional como un elemento fundamental para asegurar el desempeño, la confiabilidad y la sostenibilidad de las empresas, particularmente en la industria de construcción; en este sector, la maquinaria pesada constituye un conjunto de activos estratégicos debido a su alto valor económico y a su impacto directo en la continuidad operativa de los proyectos (Maletič, Maletič, Al Najjar, & Gomišček, 2020). De acuerdo con la norma ISO 55000, la gestión de activos permite alinear los objetivos técnicos, operativos y financieros de una organización mediante procesos estructurados y basado en información confiable (ISO 55000, 2014). En este contexto, surge una problemática universal asociada al mantenimiento de equipos pesados; la necesidad de garantizar la disponibilidad oportuna de repuestos sin comprometer de manera excesiva el capital invertido en inventarios, lo que representa un desafío recurrente para las organizaciones del sector (Segura, Gómez, & Barahona, 2024).

Los talleres de mantenimiento de maquinaria pesada enfrentan desafíos particulares asociados a la gestión de repuestos debido a la alta variedad de ítems y la demanda intermitente, lo cual implica la planificación de niveles de inventario que aseguren disponibilidad sin incurrir en costos excesivos (Quiroz & Suárez, 2023). Estudios sobre gestión de inventarios de repuestos destacan que los inventarios Maintenance, Repair and Operations (MRO) abarcan una gran cantidad de componentes con consumo irregular, lo que dificulta la aplicación de técnicas tradicionales de control y requiere enfoques especializados para equilibrar niveles de stock y servicio (Chen, Guisikhin, Finkenstaedt, & Liu, 2019) (Zhang, Huang, & Yuan, 2021). La complejidad de estos inventarios se intensifica por la necesidad de considerar tiempos de reposición, criticidad de componentes y variabilidad de fallas, elementos que impactan los costos totales y eficacia operativa de los talleres; la ausencia de repuestos críticos en el momento requerido puede provocar paradas no planificadas de equipos, generando tiempos muertos operativos y costos adicionales significativos por interrupciones del servicio y órdenes de emergencia, afectando tanto la productividad como la eficiencia de los recursos (Alomar & Nikita, 2025).

Ante este escenario, los modelos de gestión de inventarios basados en criterios de clasificación y priorización han sido abordados en la literatura como herramientas técnicas para apoyar la toma de decisiones en contextos de alta complejidad operativa (González, 2020). De

forma complementaria, el uso de herramientas tecnológicas como los sistemas de Gestión de Mantenimiento Asistido por Computador (GMAO/CMMS) se reconoce como un soporte para el registro, control y seguimiento de la información relacionada con el mantenimiento y el consumo de repuestos, fortaleciendo la trazabilidad de los procesos (Gorski, Loures, Santos, Kondo, & Martins, 2022). Bajo este enfoque, el presente capítulo tiene como propósito contextualizar la problemática relacionada con la gestión del inventario de repuestos en talleres de equipo pesado, abordando su importancia a nivel general y organizacional, así como las condiciones que motivan el desarrollo de una propuesta basada en modelos de gestión y herramientas tecnológicas.

A nivel macro, el mercado de equipos de construcción representa un sector industrial de gran relevancia económica, en 2025, fue valorado en aproximadamente USD 171.980 mil millones, y se proyecta un alcance USD 310,24 mil millones para 2034, con una tasa compuesta de crecimiento anual (CAGR) del 6,8%, reflejando una expansión sostenida de la demanda de maquinaria pesada para obras públicas y privadas; dentro de este contexto, los fabricantes líderes a nivel mundial, como Caterpillar, Komatsu, Volvo y JCB ocupan posiciones estratégicas en la producción y distribución de equipos pesados, promoviendo la adopción de tecnologías avanzadas (Fortune Business Insights, 2025). Asimismo, la industria presenta una transformación tecnológica basada en la automatización, la electrificación y la telemática, orientada a mejorar la eficiencia operativa; en particular, la telemática se ha consolidado clave, estimando un mercado global en USD 6,92 mil millones en 2024 y con un crecimiento sostenido (Global Market Insights, 2025).

En concordancia con este entorno industrial, empresas internacionales han adoptado la ISO 55000 como un marco práctico para mejorar el desempeño de sus activos, por ejemplo, Babcock International Group utilizó para estandarizar la gestión del ciclo de vida de sus activos y reducir riesgos operativos, mientras que Scottish Water la aplicó para priorizar inversiones y optimizar uso de capital, garantizando continuidad del servicio (Kelly & Hardy, 2018). De manera complementaria, estrategias avanzadas de mantenimiento como el Reliability Centered Maintenance (RCM) y el Total Productive Maintenance (TPM) son utilizadas para priorizar activos críticos, reducir fallas y promover la mejora continua (Karim, 2025). La efectividad de estos enfoques se evalúa mediante indicadores clave de desempeño (KPIs) reconocidos globalmente, tales como Overall Equipment Effectiveness (OEE), que cuantifica la eficacia de los equipos mediante la disponibilidad, rendimiento y calidad; Mean Time Between Failures (MTBF), que mide la confiabilidad de los activos, Mean Time To Repair (MTTR), indicador promedio de reparación y disponibilidad operativa, los cuales permiten comparar resultados,

establecer benchmarks y orientar la toma de decisiones en la gestión de activos y mantenimiento industrial (Chundhoo, Chattopadhyay, Karnakar, & Appyhamillage, 2025). Los principales estándares internacionales que sustentan estas prácticas se presentan de manera comparativa en la Tabla 1.

Tabla 1. *Principales estándares internacionales en gestión de activos e inventarios.*

Estándar/Norma	Organización	Año	Ámbito	Relevancia
ISO 55000	ISO	2014	Gestión de activos físicos	Marco para gestión equipos
ISO 14224	ISO	2016	Contabilidad y mantenimiento	Datos de fallas
EN 13306	CEN	2017	Terminología mantenimiento	Estandarización conceptos
MIL-STD-1388	US DoD	-	Logística de soporte	Repuestos críticos

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Por otra parte, de acuerdo con Ribeiro y Amaya , la gestión de repuestos en entorno a MRO enfrentan desafíos, como la baja rotación, alta criticidad de componentes y demanda intermitente, además menciona que una proporción significativa de piezas rara vez se consume, mientras otras pueden requerirse inesperadamente, generando riesgos de paradas operativas no planificadas (Ribeiro & Amaya, 2022) . Frente a estos desafíos, las prácticas líderes incluyen métodos de clasificación ABC/XYZ para priorizar según valor y consumo, el cálculo técnico de stock de seguridad con datos históricos y lead times, y enfoques colaborativos como Vendor Managed Inventory (VMI) para compartir responsabilidad de inventarios con proveedores estratégicos, sin aumentar costos de almacenamiento (Helmond, 2021). Igualmente, tecnologías emergentes están transformando esta gestión, tales como, el Internet de las Cosas (IoT) que permite monitorear condiciones y consumo en tiempo real, el análisis predictivo mejora los pronósticos de demanda de repuestos irregulares y tecnológicas como blockchain ofrecen trazabilidad segura de movimientos y transacciones de piezas de cada suministro (Fernandez, Blanco, Froiz, & Fraga, 2019), tal como se refleja en las tendencias tecnológicas mostradas en la Figura 1.

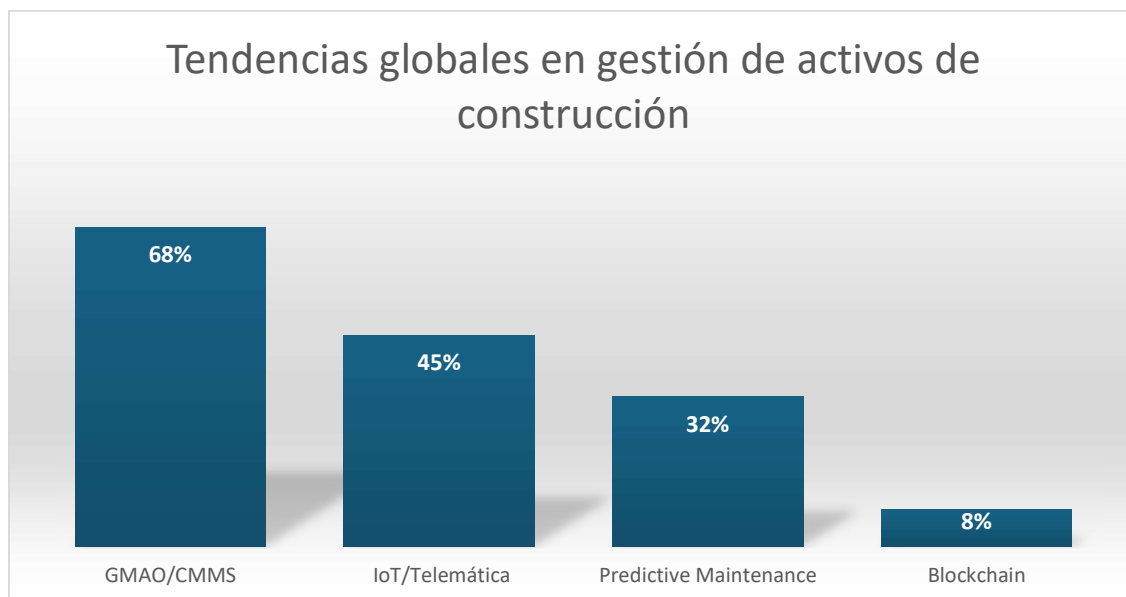


Figura 1 *Tendencias globales en gestión de activos de construcción.*
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

En este contexto global, la optimización de inventarios de repuestos mediante modelos de clasificación multicriterio (ABC-XYZ-NPR) y la integración de herramientas tecnológicas como GMAO/CMMS emergen como estrategias fundamentales para enfrentar los retos de disponibilidad, variabilidad de demanda y eficiencia de capital en industrias dependientes de maquinaria pesada. Esta relación entre gestión avanzada de inventarios y tecnologías de mantenimiento refleja una tendencia global que influye directamente en las prácticas operativas y de mantenimiento de empresas en diversos sectores industriales.

A nivel meso, el sector de la construcción en Ecuador constituye una de las principales actividades productivas del país y muestra un dinamismo relevante dentro de la estructura económica, según datos oficiales del Banco Central del Ecuador, el valor agregado bruto del sector alcanzó aproximadamente USD 4.317, 72 millones en 2022, representando una participación cercana al 6,09% del PIB total, lo que lo coloca como uno de los sectores con mayor incidencia relativa dentro de la economía ecuatoriana (Corporación Financiera Nacional, 2023). La construcción abarca sectores clave como la infraestructura vial, edificación residencial y comercial, así como proyectos de ingeniería civil vinculados a transporte y servicios públicos, los cuales dependen en gran medida de programas de inversión estatal y crédito para la inversión privada, que incluye la adquisición de maquinaria, equipos y materiales (Banco Central del Ecuador, 2024).

En los últimos cinco años, la inversión pública en infraestructura en Ecuador ha mostrado una dinámica heterogénea con fluctuaciones y desafíos de ejecución, en 2021-2022,

según análisis de sectores, la asignación del Plan Anual de Inversiones (PAI) para obra pública fue sólida y 2023 el PAI sumó USD 1 871 millones, lo que representó cerca del 1,5% del PIB (Tapia, 2022); por otro lado, para el 2024, el estado ecuatoriano asignó cerca de USD 1.874 millones al PAI para obra pública, 2025 fue de 449 millones y para 2026 un presupuesto de USD 2.181 millones (Tapia , 2025).

De acuerdo con los registros oficiales de la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE, 2024), las importaciones mensuales de maquinaria pesada y tractores han mostrado un comportamiento sostenido entre 2021 y 2024, con picos que superan las 500 unidades mensuales en determinados períodos (Figura 2). Además, Las marcas de equipos pesados que se comercializan en Ecuador, son Caterpillar, CASE y Hyundai, disponibles tanto nuevos como usados para su utilización en obras civiles y proyectos de infraestructura.

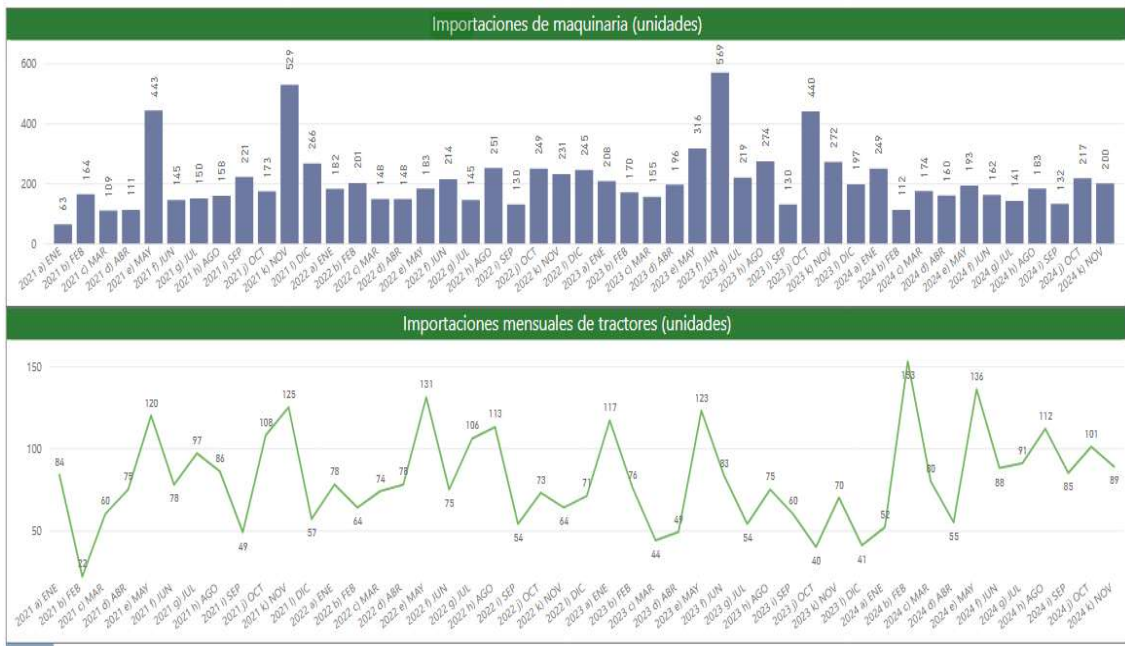


Figura 2 Importaciones de maquinaria pesada.
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

La creciente importación de repuestos para maquinaria pesada desde países como China y otros mercados asiáticos respalda la alta dependencia de insumos externo para el mantenimiento de estos equipos, con importaciones que forman parte del flujo principal de bienes de consumo y capital involucrado en operaciones de mantenimiento técnico. En este contexto, en la Tabla 2, se presentan los tiempos de entrega tipos (lead time) para repuestos especializados basados en datos de proveedores locales (2024-2025), los cuales suelen oscilar entre 30 y 90 días, debido a los procesos logísticos y aduaneros asociados a la importación

desde los países de origen de los fabricantes, lo que representa un rete operativo para la planificación de inventarios y la continuidad operativa de los equipos en los talleres del país (Paccha, 2023).

Tabla 2 Comparación de lead times de respuestas: Ecuador vs. Región.

Tipo de repuesto	Lead time Ecuador	Lead Latinoamérica	Lead Time USA/Europa
Filtros (stock)	5-10 días	3-7 días	1-3 días
Filtros (pedido especial)	30-45 días	15-30 días	7-14 días
Partes mecánicas (stock)	10-20 días	7-15 días	2-5 días
Partes mecánicas (pedido)	60-90 días	30-60 días	14-30 días

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

En el país, la gestión de repuestos para maquinaria pesada presenta una problemática estructural asociada principalmente a la dificultad de acceso a repuestos originales, tanto por los largos tiempos de importación como por los altos costos derivados de la dependencia del mercado externo, lo que limita la capacidad de respuesta de los talleres ante fallas imprevistas (Barreno, Landin, & Moreira, 2023). Esta situación ha propiciado el uso recurrente de repuestos genéricos o alternativos, especialmente en pequeñas y medianas empresas del sector, los cuales, si bien reducen costos iniciales, incrementan el riesgo de fallas prematuras, disminución de la vida útil de los equipos y mayores costos de mantenimiento a mediana plazo (Macias, Lizandro, & Segundo, 2025). A ellos se suma la escasa integración de herramientas tecnológicas en procesos de mantenimiento, con baja adopción de sistemas GMAO/CMMS, estimada en menos del 20% de las empresas; como consecuencia, se genera una inmovilización significativa de capital de trabajo en inventarios mal gestionados (Ayora, Rendon, & Lara, 2024),

En marco regulatorio y normativo a nivel nacional aplicable a talleres de mantenimiento y manejo de repuestos se articula en tres ejes, la normalización técnica, obligaciones laborales de seguridad industrial y regulación ambiental. En materia de estándares técnicos, el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) promueve normas alineadas a sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo, como la ISO 45001, que orienta la prevención de riesgos y la mejora del desempeño en seguridad ocupacional en organizaciones industriales (ISO 45001, 2018). Complementariamente, para la señalización y comunicación de peligros en instalaciones la NTE-INEN-ISO-3864-1 y 3864-2, establecen los colores, formas y símbolos de seguridad. En el ámbito laboral, el Reglamento de Seguridad y Salud de los Trabajadores y Mejoramiento del Medio Ambiente de Trabajo, establecido mediante el Decreto Ejecutivo N.º2393.

El componente ambiental complementa el marco regulatorio puesto que el Código Orgánico del Ambiente exige planes de gestión para desechos como lubricantes usados, filtros

contaminados y envases de residuos de hidrocarburo, lo cual obliga a establecer planes de gestión ambiental dentro del taller.

En el contexto ecuatoriano, la gestión eficiente de inventarios de puestos mediante herramientas tecnológicas se convierte en una necesidad estratégica para empresas del sector de la construcción, debido a la dependencia de importaciones y a largos períodos de entrega de repuestos, que incrementan el riesgo de indisponibilidad operativa; además, estas condiciones hacen indispensable la definición de stocks de seguridad técnicamente calculados, en este sentido, la integración de sistemas GMAO/CMMS permite mejorar la planificación, el control del consumo y la toma de decisiones, vinculando directamente la gestión del inventario con la disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

A nivel micro, la Empresa HIDRO S.A. es una empresa privada ecuatoriana dedicada a la generación de energía limpia y renovable, específicamente en el sector de generación hidroeléctrica, orientada a proyectos de autogeneración para sectores productivos. La empresa tiene sede administrativa en la ciudad de Quito, ubicada en la Av. Interoceánica E5-67 km 16.5, Tumbaco, mientras que el proyecto hidroeléctrico HIDRO S.A. se localiza en la cuenca del río Machinaza, en la provincia de Zamora Chinchipe, dentro de una zona estratégica de alto consumo energético. La compañía opera como promotora y desarrolladora de proyectos hidroeléctricos privados, con enfoque en la sostenibilidad, cuenta con un tamaño organizacional media, con un rango estimado de 51 a 200 empleados, y desarrolla proyectos de generación eléctrica destacando proyectos con una potencia aproximada 100 MW.

Antecedentes

En el taller de mantenimiento de equipo pesado de HIDRO S.A. (Proyecto Hidroriente S.A., Ríos Machinaza), la ejecución del mantenimiento preventivo depende de la disponibilidad oportuna de repuestos y consumibles críticos en bodega. Sin embargo, la documentación interna evidencia que dicha disponibilidad no se garantiza de forma consistente, lo que interrumpe el cumplimiento del plan preventivo y deteriora el desempeño operativo. Cabe señalar que esta situación no se limita a eventos aislados, sino que se manifiesta como un patrón repetitivo en distintos hitos de mantenimiento y en más de un tipo de activo, lo cual configura un problema logístico asociado a la gestión de inventarios en un entorno de operación continua.

La evidencia proviene de reportes oficiales de mantenimiento preventivo correspondientes a dos equipos (cargadora CAT R1600G y retroexcavadora XCMG XC8-C2570) en cuatro hitos de horómetro (250, 500, 750 y 1000 horas). En la muestra revisada, se

identifica explícitamente un quiebre de stock en 5 de los 8 reportes analizados, lo que equivale a una incidencia documental del 62,5%. Es importante aclarar que este valor no representa todavía una tasa anual consolidada; no obstante, es suficiente para demostrar recurrencia en la evidencia técnica disponible y justificar la necesidad de una intervención basada en modelos de gestión e instrumentos tecnológicos.

La manifestación del problema se presenta bajo tres formas operativas principales. En primer lugar, se registran mantenimientos incompletos, donde el preventivo queda “pendiente” debido a la falta de repuestos en bodega. En segundo lugar, se evidencian reprogramaciones, en las cuales el mantenimiento no se ejecuta en el hito planificado, sino cuando el ítem requerido está disponible. En tercer lugar, se documenta la duración del mantenimiento, cuando la falta de repuestos extiende el tiempo real de intervención y genera tiempo muerto directo. En conjunto, estas tres manifestaciones confirman que el quiebre de stock no solo afecta el abastecimiento, sino que altera el cumplimiento del mantenimiento preventivo y su eficiencia operativa.

La información disponible permite, a su vez, cuantificar la degradación del cumplimiento del intervalo de mantenimiento mediante el desfase entre el hito objetivo y el horómetro real de ejecución. En los eventos asociados a un quiebre de stock, se observan desfases positivos relevantes, tales como +38 h (250 h→288 h), +94 h (500 h→594 h), +75 h (500 h→575 h) y +17 h (250 h→267 h). Al analizarlos en términos agregados, estos casos reflejan que el mantenimiento preventivo tiende a ejecutarse de manera condicionada por el abastecimiento y no por el plan, lo cual es consistente con un problema de control de inventarios y reposición.

Un hallazgo crítico se relaciona con la trazabilidad y el control: en algunos reportes, el checklist de recepción de repuestos, aceite y suministros se registra como "OK" pese a que el texto del mismo documento indica reprogramaciones por faltantes. En otros casos, se marca como “NO” cuando el faltante es explícito. Dicha inconsistencia indica debilidades en el registro operacional y en la confiabilidad del control de inventarios, lo cual respalda aún más la necesidad de integrar herramientas tecnológicas (por ejemplo, GMAO/CMMS) que permitan una adecuada trazabilidad, actualización de consumos, disparo de reposición y control de niveles mínimos en tiempo real.

En consecuencia, el problema central se configura como una cadena causa–efecto: la bodega no asegura la disponibilidad oportuna de repuestos y consumibles críticos (causa operativa de inventario), lo que conduce a reprogramaciones, mantenimientos incompletos y exceso de horas (efecto en mantenimiento) y, a su vez, se traduce en mayor indisponibilidad

del equipo y costos operativos adicionales por paradas, mano de obra extendida y abastecimiento reactivo (efecto logístico y de negocio). Esta lectura es coherente con el enfoque del estudio, debido a que demanda la aplicación de modelos de gestión de inventarios (clasificación, parámetros de reposición, stock de seguridad) y herramientas tecnológicas que reduzcan la brecha entre stock registrado y stock disponible.

Con base en lo anterior, el problema puede formularse de manera concreta en una sola oración: en el taller de equipo pesado de HIDRO S.A. se presentan quiebres recurrentes de stock de repuestos y consumibles críticos asociados al mantenimiento preventivo, los cuales están evidenciados en 5 de los 8 reportes revisados, y lo que provoca reprogramaciones, mantenimientos incompletos y aumento del tiempo de intervención (hasta +8 horas), lo cual afecta finalmente la disponibilidad operativa de los equipos.

Justificación

La optimización del inventario de repuestos MRO en el taller de equipo pesado de la empresa HIDRO S.A. se justifica debido a que la evidencia operativa muestra que la indisponibilidad de ítems críticos altera la ejecución del mantenimiento preventivo y genera tiempos improductivos medibles. En efecto, en los reportes del taller se registran reprogramaciones por falta de filtros de aceite, faltantes de aceite de motor y demoras adicionales por la ausencia de repuestos en bodega; por ejemplo, se documenta una extensión de la intervención de 8 horas por no disponer del filtro de aceite de transmisión.

La importancia del estudio radica en que la gestión de repuestos y consumibles no se limita a la administración física de la bodega, sino que constituye un componente fundamental para el aseguramiento de la disponibilidad operacional del activo. Desde un enfoque normativo, la familia ISO 55000 establece principios para gestionar activos durante su ciclo de vida, con resultados esperados asociados al desempeño, al valor y al control sistemático de la información (Icontec, 2024).

En el contexto nacional, Ecuador ha adoptado la ISO 55000 como Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-ISO 55000, lo que refuerza la pertinencia de contrastar la práctica organizacional con un marco reconocido (Ministerio de de Transporte y Obras Públicas, 2016). La ISO 14224, por su parte, define un lenguaje y una estructura para recolectar datos de confiabilidad y mantenimiento, lo cual respalda que la criticidad y las necesidades de repuestos deben derivarse de datos estandarizados y no de decisiones subjetivas (ISO, 2000).

El impacto esperado se expresa en la reducción de la variabilidad operativa asociada a quiebres de stock, lo cual permitirá disminuir reprogramaciones, tiempos de espera y

ampliaciones de la intervención. En términos de gestión de activos, la disponibilidad y la confiabilidad se fortalecen cuando la información de repuestos se integra al sistema de activos y se controla de manera trazable, lo que permite tomar decisiones de reposición alineadas al desempeño esperado del equipo y a la continuidad del mantenimiento preventivo.

La utilidad del estudio se sustenta en que el inventario MRO se caracteriza por demanda intermitente e incertidumbre; por ello, la literatura enfatiza políticas basadas en datos y nivel de servicio para mitigar el impacto del downtime. En este sentido, la investigación en gestión de repuestos describe que el objetivo central es reducir las consecuencias de la indisponibilidad con un costo económico mínimo, conectando así el inventario con la disponibilidad del sistema (Hu, Boylan, Chen, & Labib, 2018).

En esta línea, enfoques cuantitativos recientes proponen pronóstico y control dinámico de los inventarios apoyados en planes de mantenimiento, logrando mejoras económicas frente a métodos tradicionales (Zhu, Jaarsveld, & Dekker, 2020). De forma complementaria, la clasificación ABC/XYZ permite segmentar los repuestos por valor y variabilidad de la demanda, diferenciando las estrategias de control para ítems de alto impacto económico y/o alta incertidumbre. En paralelo, la priorización por criticidad basada en FMECA (Análisis de Modos de Falla, Efectos y Criticidad), y el uso de RPN/NPR (Número de prioridad de riesgo), permite jerarquizar los repuestos por riesgo operativo, superando la evaluación exclusiva por costo (Gong, Luo, Qiu, & Wang, 2022).

Los beneficiarios directos corresponden al área de mantenimiento y al almacén de repuestos, pues ahora dispondrán de reglas de reposición y priorización más robustas, con mayor consistencia entre el consumo real, el stock disponible y los requerimientos del plan preventivo. A nivel operativo, la organización se beneficia mediante una mejor disponibilidad del equipo y una menor dependencia de compras urgentes. A nivel de gestión, la trazabilidad facilita el control interno y el seguimiento de indicadores de desempeño del inventario y del mantenimiento.

La factibilidad de la propuesta se fundamenta en la disponibilidad de información operativa del propio proceso (reportes de mantenimiento, requerimientos de repuestos/consumibles y registros de ejecución), lo que permite construir una base cuantitativa para clasificar ítems, estimar la demanda y definir políticas de reposición. Además, la factibilidad también es tecnológica, dado que la solución requiere trazabilidad y control operacional sostenido. En este sentido, un CMMS/GMAO permite integrar activos, órdenes de trabajo y el consumo de repuestos, además de habilitar puntos de reorden y reducir errores por

control manual del almacén, asegurando así la continuidad del control mediante información actualizada y medible.

En síntesis, el estudio se justifica porque existe una brecha verificable entre una gestión reactiva del inventario MRO, los marcos normativos y científicos que recomiendan una gestión basada en datos, criticidad y soporte tecnológico. De este modo, la propuesta busca cerrar esa brecha mediante modelos de gestión de inventario MRO (clasificación, criticidad y políticas de reposición) y herramientas tecnológicas (GMAO/CMMS), las cuales proporcionarán trazabilidad e indicadores que permitan demostrar mejoras operativas y económicas de forma objetiva.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema de gestión del inventario de repuestos que optimice la disponibilidad de partes utilizadas en los mantenimientos de maquinaria pesada en HIDRO S.A., mediante la aplicación de modelos de clasificación ABC-XYZ y criticidad NPR, y la integración de herramientas tecnológicas tipo GMAO/CMMS, con el fin de reducir quiebres de stock y demoras asociadas a la ejecución del mantenimiento preventivo.

Objetivos Específicos

- Clasificar el 100 % de los ítems activos del catálogo MRO mediante los modelos ABC y XYZ, con el fin de generar una segmentación estratégica que concentre al menos el 75 % del valor en la Clase A y sustente políticas de control diferenciadas por segmento.
- Determinar los niveles óptimos de stock de seguridad y punto de reorden para los repuestos Clase A mediante un modelo probabilístico basado en 12 meses de demanda histórica, la variabilidad del consumo y lead times reales, con niveles de servicio diferenciados por criticidad NPR (≥ 98 % alta, ≥ 85 % baja).
- Diseñar e implementar un sistema GMAO/CMMS que registre el 100 % de los movimientos OT–inventario–compras, habilite alertas automáticas sobre el punto de reorden y reduzca las horas perdidas por faltantes en al menos un 80 % respecto de la línea base AS-IS.

CAPÍTULO II

INGENIERÍA DEL PROYECTO

El presente capítulo desarrolla la ingeniería del proyecto para la empresa HIDRO S.A., con énfasis en la interacción operativa entre el taller de equipo pesado, la bodega de repuestos y el proceso de abastecimiento/compras. Dicho propósito consiste en transformar la situación diagnosticada en un sistema técnico de gestión de inventario MRO, sustentado en los datos del proceso y orientado a la disponibilidad del mantenimiento preventivo.

En primera instancia, se consolida el diagnóstico mediante evidencia documental y métricas de desempeño del inventario, con el fin de establecer una línea base verificable. A continuación, se define el área de estudio y se formaliza el modelo operativo del flujo mantenimiento, almacén, compras, tanto en su configuración actual como en la propuesta. Este modelado organiza entradas, actividades, responsables y salidas, a la vez que fija los puntos de control del sistema.

El modelo operativo propuesto se desarrolla mediante: (i) la clasificación ABC-XYZ para segmentar los repuestos por impacto económico y variabilidad, (ii) la criticidad NPR para priorizar ítems por riesgo operativo, (iii) un modelo probabilístico/estocástico para repuestos de alta criticidad, el cual determina el stock de seguridad y el punto de reorden, y (iv) el diseño de soporte GMAO/CMMS para trazabilidad y control del consumo. De esta manera, el capítulo entrega todos los parámetros, reglas e indicadores necesarios para implementar y evaluar la optimización del inventario en HIDRO.

La selección de las herramientas metodológicas se fundamenta en criterios técnicos y en evidencia de la literatura especializada. La Tabla 3 sintetiza la justificación de cada herramienta frente a las alternativas evaluadas.

Tabla 3 *Justificación de la selección de herramientas metodológicas.*

Herramienta	Alternativa evaluada	Criterio de selección	Referencia
ABC-XYZ	ABC simple	XYZ incorpora variabilidad de demanda, crítica en MRO intermitente.	Zhang et al. (2021)
NPR (AMEF)	Solo costo	Captura severidad, ocurrencia y detectabilidad; supera evaluación por valor.	Gong et al. (2022)
SS/ROP estocástico	EOQ determinístico	Demanda MRO no constante; ajusta SS al NS objetivo y variabilidad real.	Hu et al. (2018)
GMAO/CMMS	Excel / bitácoras	Trazabilidad automatizada, alertas en tiempo real, integración OT-inventario.	Gorski et al. (2022)

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Diagnóstico de la situación actual de la empresa (HIDRO S.A.)

El diagnóstico se sustenta en la evidencia documental generada por el taller de equipo pesado y en el flujo de abastecimiento vigente que articula el mantenimiento, la bodega y las compras. En HIDRO S.A., la ejecución del mantenimiento preventivo depende de la disponibilidad oportuna de repuestos y consumibles MRO; sin embargo, los reportes técnicos registran eventos donde la falta de ítems en bodega produce reprogramaciones, actividades pendientes y extensiones del tiempo de intervención.

En particular, se documentan reprogramaciones por la ausencia de filtros de aceite y de aceite de motor, pendientes por falta de filtros de aire y una demora adicional de 8 horas asociada a la indisponibilidad del filtro de aceite de transmisión. En conjunto, estos hallazgos evidencian que el desempeño del preventivo queda condicionado por el nivel de servicio del inventario.

De manera que, el diagnóstico se orienta a cuantificar la situación actual y a establecer una línea base verificable, la cual esté conectada con las variables que sostienen la propuesta: la segmentación de repuestos mediante ABC-XYZ, el tratamiento de la demanda intermitente, la estimación del lead time, el dimensionamiento del stock de seguridad y del punto de reorden, y la implementación de la trazabilidad del consumo y de la reposición mediante soporte GMAO/CMMS.

Para asegurar la consistencia metodológica, en esta sección se organiza la evidencia en cuatro partes: (i) la descripción y mejora de procesos AS-IS/TO BE y sus puntos de decisión, (ii) la consolidación de eventos documentados de quiebres o demoras, (iii) la caracterización cuantitativa mínima del inventario (consumo, quiebres, lead time) y (iv) la definición de indicadores base que permitan medir el desempeño actual y comparar las mejoras posteriores.

Proceso actual mantenimiento–bodega–compras (AS-IS)

En la documentación interna del proceso de abastecimiento, se establece que la provisión de repuestos y suministros para el taller se articula entre las áreas de Operaciones, Mantenimiento, Bodega, Compras, Proveedores y Finanzas, con el propósito de asegurar materiales críticos para la continuidad operativa de los equipos, como se observa en la Figura 3 y Tabla 4. En este flujo, el área de Mantenimiento actúa como el eje técnico al definir los requerimientos conforme a planes preventivos y correctivos; la Bodega controla el inventario y gestiona el despacho; el área de Compras ejecuta el abastecimiento externo cuando no existe stock; los Proveedores suministran; y el área de Finanzas controla el presupuesto y los pagos.

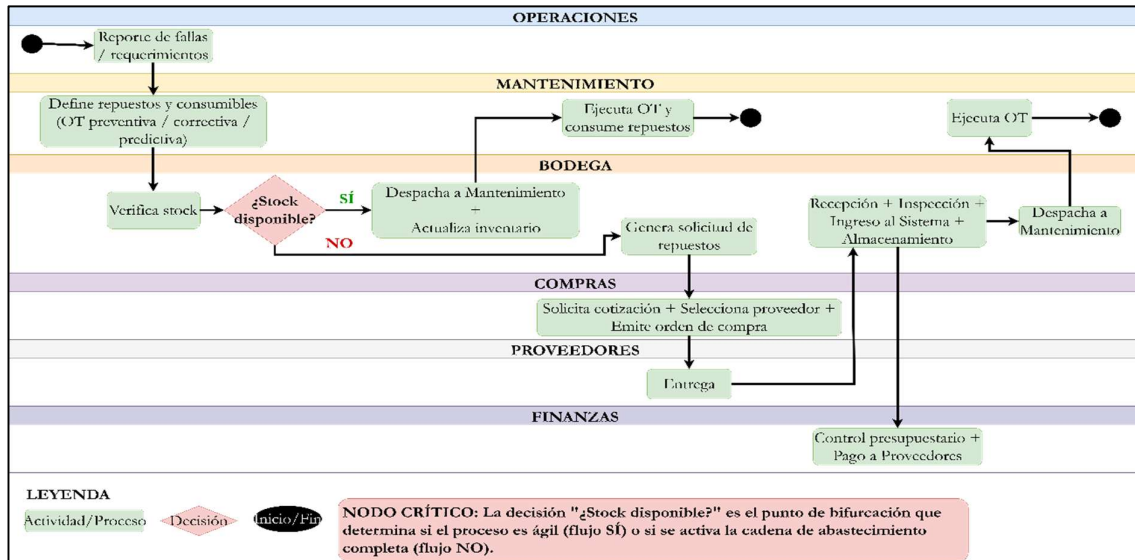


Figura 3 Diagrama AS-IS del flujo real de repuestos.

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Operativamente, el proceso se gobierna por un punto de decisión crítico: la verificación de disponibilidad en bodega (“Stock disponible” vs. “No en stock”). Si sí existe disponibilidad, se ejecuta el despacho a mantenimiento y se actualiza el inventario; pero si no existe, entonces se activa una solicitud de repuestos que desencadena la cotización, la selección de proveedor y la emisión de una orden de compra, los cuales son pasos que continúan hasta completar la recepción y el ingreso, posteriormente el despacho para la ejecución de la OT. De este modo, este punto de integración conecta el desempeño de la bodega con el cumplimiento del mantenimiento programado, con los costos y tiempos de reposición del abastecimiento.

En consecuencia, estos datos son aquellos que permiten, en capítulos posteriores, calcular la rotación, los quiebres, el lead time, el nivel de servicio, y alimentar la clasificación ABC-XYZ y el modelo probabilístico/estocástico sin introducir supuestos no verificables.

Tabla 4 Puntos de decisión del AS-IS y datos mínimos a registrar para trazabilidad y modelación.

Punto de decisión / control	Área responsable	Decisión / acción	Dato mínimo requerido (variable del modelo / trazabilidad)	Evidencia / soporte
Verificación de stock	Bodega	Determina “Disponible / No en stock”	Stock disponible (on-hand), stock comprometido/reservado, ubicación, fecha-hora de consulta	Nodo “Verificar stock” + estados “STOCK DISPONIBLE / NO EN STOCK”

Punto de decisión / control	Área responsable	Decisión / acción	Dato mínimo requerido (variable del modelo / trazabilidad)	Evidencia / soporte
Despacho y actualización	Bodega	Despacha a Mantenimiento y registra salida	Código ítem, cantidad despachada, OT asociada, equipo, fecha de salida, saldo posterior	“Despacho a Mantenimiento y actualización del inventario”
Solicitud de repuestos	Bodega	Genera solicitud cuando no hay stock	Ítem requerido, cantidad, prioridad, fecha solicitud, causa (preventivo/correctivo), criticidad preliminar	“SOLICITUD DE REPUESTOS” y ruta “NO EN STOCK”
Gestión de compra	Compras	Cotiza, selecciona proveedor, emite OC	Lead time comprometido, proveedor, costo, fecha de OC, fecha promesa	“Solicitud de cotización”, “Selección de proveedor”, “Órdenes de compra”
Recepción e ingreso	Bodega	Recibe, inspecciona, ingresa al sistema	Fecha recepción, cantidad recibida, discrepancias, lote/guía, ubicación de almacenamiento	“Recepción”, “Inspección”, “Ingreso al Sistema”, “Almacenamiento”
Control presupuestario y pago	Finanzas	Verifica presupuesto y paga	Centro de costo, aprobación, fecha de pago, costo real	“Control presupuestario”, “Pago a Proveedores”, “Análisis de costos”
Cierre técnico de OT	Mantenimiento	Ejecuta OT y documenta consumo	Consumo real por OT, tiempo de intervención, hallazgo/falla asociada, repuestos utilizados	Rol de Mantenimiento como eje técnico y ejecución asociada a repuestos/consumibles

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Evidencia documental del problema (síntomas medibles)

La evidencia documental del taller confirma que la indisponibilidad de los repuestos y de los consumibles críticos afecta directamente la ejecución del mantenimiento preventivo en HIDRO S.A. En los reportes técnicos se registran tres patrones operativos consistentes: (i) mantenimientos reprogramados debido a los faltantes en bodega, (ii) la extensión del tiempo de intervención por la espera de repuestos, y (iii) actividades que quedan pendientes por no contar con ítems en stock. Con el propósito de objetivar estos síntomas, la Tabla 5 consolida los eventos reales extraídos de los reportes del taller, incorporando el equipo, el horómetro, el ítem faltante y el impacto medible.

Como se observa en la Tabla 5, los eventos de reprogramación evidencian que tanto la fecha como el horómetro de ejecución del preventivo quedan subordinados a la disponibilidad del inventario. Esta condición reduce la confiabilidad del plan de mantenimiento, dado que

desplaza la intervención desde un criterio técnico (horas objetivo) hacia un criterio reactivo (existencia del ítem). En consecuencia, en la práctica, el mantenimiento deja de ejecutarse cuando corresponde y pasa a ejecutarse cuando el repuesto o consumible está disponible.

Tabla 5 *Eventos documentados de quiebres, reprogramaciones y demoras.*

Equipo	Tipo de mantenimiento	Fecha	Horómetro	Ítem faltante / condición	Impacto medible	Evidencia documental
Retroexcavadora XCMG	500 h	24/04/2025	575 h	Filtro de aceite de transmisión no disponible en bodega	+8 horas adicionales de mantenimiento	“no se tenía en bodega... y el mantenimiento demoró 8 horas más”
Cargadora CATERPILLAR	250 h (programado a 288 h)	02/01/2025	288 h	Bodega sin filtro de aceite en stock	Reprogramación del mantenimiento	“Se programa. ya que no tenía filtro de aceite en stock”
Cargadora CATERPILLAR	500 h (programado a 594 h)	05/04/2025	594 h	Bodega sin aceite para motor en stock	Reprogramación del mantenimiento	“Se programa. Ya que. no tiene aceite para motor en stock”
Cargadora CATERPILLAR	750 h	02/08/2025	749 h	Queda pendiente reemplazo de filtros de aire por falta de stock	Actividad pendiente (mantenimiento incompleto)	“queda pendiente... ya que... no lo tiene en stock”

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

El caso documentado de una demora adicional de 8 horas transforma el quiebre de stock en un impacto operativo directo, medible en tiempo de intervención. Este tipo de eventos no solo incrementa las horas-hombre del taller, sino que también incrementa el tiempo de indisponibilidad del equipo, por lo cual debe incorporarse posteriormente en indicadores como las horas perdidas por faltantes y, en etapas posteriores del análisis, en su valoración económica.

Por otra parte, las actividades pendientes muestran que el mantenimiento puede ejecutarse de manera incompleta cuando no se dispone de ítems críticos. Dicha condición

compromete el estándar de intervención definido para el preventivo, pues obliga a reprocesos o a reingresos del equipo para completar tareas, lo que afecta tanto la eficiencia operativa como la variabilidad del proceso de mantenimiento.

Caracterización cuantitativa del inventario actual (línea base)

La caracterización cuantitativa del inventario en HIDRO S.A. se establece con base en dos insumos documentales del proyecto. El primero es la lista maestra de filtros, aceites y grasas para la retroexcavadora XC8-C2570, la cual fija los parámetros mínimos de control por ítem. El segundo es el listado de inventario (Inventario H), que consolida consumos mensuales, consumo anual, costo unitario y valor anual por SKU (Código alfanumérico único). En conjunto, estos documentos permiten construir una línea base verificable para las variables del modelo (demanda histórica, variabilidad, criticidad operativa y parámetros de reposición).

En primer lugar, la lista maestra de la retroexcavadora XC8-C2570 define una estructura mínima de catálogo MRO que integra la descripción del ítem, el número de parte, la cantidad requerida por intervención y un nivel de stock requerido. Asimismo, el formato explicita un umbral de alerta indicado como “ALERTA MÍNIMO (2)”, el cual opera como señal de reposición preventiva para evitar quiebres en consumibles críticos. Por lo tanto, la Tabla 6 resume esta línea base documental, la cual es indispensable para normalizar el catálogo (partes originales/alternas) y para conectar el control del stock con el consumo por mantenimiento.

Tabla 6 *Línea base documental de repuestos y consumibles (XC8-C2570): estructura mínima del maestro MRO.*

Grupo	Ítem	# Parte original	# Parte alterno	Cantidad por mantenimiento	Stock requerido	Umbral de alerta
Filtros	Filtro de aceite para motor	LF16352	—	1	5	“Alerta mínimo (2)” *
Filtros	Filtro de combustible primario	SFC-55170	—	1	5	“Alerta mínimo (2)” *
Filtros	Filtro de combustible secundario	FF5706	FF5706	1	5	“Alerta mínimo (2)” *
Filtros	Filtro de la transmisión	1272101764	—	1	5	“Alerta mínimo (2)” *
Filtros	Filtro de retorno hidráulico	1.5803E+10	—	1	5	“Alerta mínimo (2)” *
Filtros	Filtro de succión hidráulico	803403761	P560971	1	5	“Alerta mínimo (2)” *

Grupo	Ítem	# Parte original	# Parte alterno	Cantidad por mantenimiento	Stock requerido	Umbral de alerta
Filtros	Filtro de aire primario	AF26614	—	1	5	“Alerta mínimo (2)” *
Filtros	Filtro de aire secundario	AF26613	—	1	5	“Alerta mínimo (2)” *
Fluidos/grasas	Aceite motor CI-4 15W40	—	—	2.5 gls	55 gls	(no especifica)
Fluidos/grasas	Aceite convertidor/transmisión Mobil 424	—	—	5 gls	55 gls	(no especifica)
Fluidos/grasas	Aceites diferenciales GL-5 80W90	—	—	6 gls	55 gls	(no especifica)
Fluidos/grasas	Aceite hidráulico ISO-46	—	—	15 gls	55 gls	(no especifica)
Fluidos/grasas	Refrigerante ZEREX HD	—	—	2 gls	55 gls	(no especifica)
Fluidos/grasas	Grasa de litio NLGI	—	—	3 lbs	50 lbs	(no especifica)

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Un hallazgo técnico relevante de esta línea base es la inconsistencia verificable entre el parámetro definido y la disponibilidad real en el punto de consumo. Así, aunque el maestro exige un stock requerido para el “filtro de la transmisión (1272101764)”, el reporte de mantenimiento de 500 horas documenta que dicho ítem no estuvo en stock en bodega y que este evento generó +8 horas de demora.

Esta evidencia no permite afirmar con certeza la causa (error de registro, incumplimiento de reposición, o desalineación catálogo–bodega), pero sí confirma la brecha “parámetro declarado vs. disponibilidad efectiva”, la cual debe ser cuantificada y corregida con trazabilidad y control de reposición.

De forma complementaria, los reportes del taller incorporan información operativa que ya aporta datos iniciales de lead time y de quiebre. En concreto, en el mantenimiento de 250 horas de la XC8-C2570 se registra que el filtro primario no se recibe y que la bodega no lo tiene en stock, indicando explícitamente un tiempo de llegada esperado de 5 días. Por lo tanto, este dato constituye un primer insumo documental para el parámetro lead time, el cual luego debe consolidarse con órdenes de compra y fechas de recepción para estimar su distribución y variabilidad.

En segundo lugar, la cuantificación del inventario se fortalece con el archivo Inventario H, el cual estructura por SKU el consumo mensual (M1–M12), el consumo anual, el costo unitario y el valor anual, elementos que son necesarios para establecer la línea base de demanda, así como, para la clasificación ABC/XYZ posterior. De hecho, la Tabla 7 muestra una extracción representativa de consumibles tipo filtros, donde se evidencia que el sistema maneja múltiples SKUs con descripciones afines (por ejemplo, “Filtro de transmisión” y “Filtro de aceite de transmisión”), lo que obliga a normalizar el catálogo (códigos ↔ números de parte) para evitar duplicidades, compras paralelas y sesgos en la estimación de demanda.

Tabla 7 *Extracto de consumos y costo anual de consumibles tipo filtros (Inventario H).*

Item_ID	Familia	Descripción	Costo unitario	Consumo anual	Valor anual	Promedio mensual
IT_003	Consumible / Filtros	Filtro de combustible secundario	20.44	288	5,886.72	24
IT_007	Consumible / Filtros	Filtro de aire secundario	39.54	128	5,061.12	10.67
IT_009	Consumible / Filtros	Filtro de transmisión	9.6	389	3,734.40	32.42
IT_014	Consumible / Filtros	Filtro de aceite de transmisión	10.99	84	923.16	7
IT_005	Consumible / Filtros	Filtro hidráulico de presión	11.61	279	3,239.19	23.25

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

A partir de esta evidencia, la línea base cuantitativa queda definida con dos niveles de control: (i) el catálogo y los parámetros declarados por equipo (maestro XC8-C2570), y (ii) la demanda y el costo por SKU (Inventario H). Esta doble capa es metodológicamente necesaria, dado que el modelo propuesto depende de la consistencia entre la descripción, el código y el número de parte, el consumo mensual real, y las reglas de reposición (mínimos/alertas/stock requerido). Por lo tanto, en los apartados siguientes, tanto la clasificación ABC-XYZ como el modelo probabilístico deben construirse sobre un catálogo depurado, evitando así que SKUs duplicados distorsionen tanto la criticidad como el cálculo de stock de seguridad.

La caracterización cuantitativa requiere, para cerrarse sin inferencias, integrar campos que en estos documentos aparecen de forma parcial (por ejemplo, tiempos de entrega consolidados y niveles reales de existencias). Por ello, la Tabla 8 deja establecidos los datos mínimos que deben extraerse de la bodega y las compras para cerrar definitivamente la línea

base en términos de rotación, quiebres, lead time, capital inmovilizado, y manteniendo la trazabilidad por SKU y por equipo.

Tabla 8 *Datos mínimos para cerrar la línea base cuantitativa del inventario (variables del modelo y fuente interna).*

Variable a caracterizar	Dato mínimo	Fuente interna	Responsable
Consumo (demanda)	Salidas mensuales por SKU (M1–M12)	Inventario H / kardex	Bodega
Costo y valor	Costo unitario y valor anual por SKU	Inventario H / contabilidad	Finanzas
Lead time	Fecha OC, fecha recepción, variabilidad	Órdenes de compra + recepción	Compras/Bodega
Quiebres	Evento “no en stock”, fecha, ítem, impacto	Reportes de mantenimiento + kardex	Mantenimiento/Bodega
Rotación	Consumo anual / inventario promedio	Kardex + existencias mensuales	Bodega
Repuestos críticos	SKU ↔ parte ↔ equipo ↔ criticidad	Maestro por equipo + OT	Mantenimiento/Bodega

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Indicadores base del inventario

Para que el diagnóstico sea medible y verificable, el desempeño del inventario MRO en HIDRO S.A. se expresa mediante un conjunto de indicadores base que relacionan la disponibilidad, la reposición y el control económico. Estos indicadores se establecen antes de llevar a cabo la optimización, con el fin de disponer de una línea base comparable y consistente con el modelo propuesto (clasificación ABC-XYZ, tratamiento de demanda intermitente y parametrización de reposición). En este sentido, la Tabla 9 consolida tanto la definición operativa, como la ecuación, la unidad, la periodicidad y la fuente mínima requerida, de acuerdo con la necesidad metodológica de sustentar el diagnóstico en datos reales.

Tabla 9 *Indicadores base propuestos (fórmula, unidad, periodicidad y fuente).*

Indicador	Definición operativa	Fórmula	Unidad	Periodicidad	Fuente mínima
Nivel de servicio (Fill Rate)	Porcentaje de demanda atendida sin quiebre en el punto de consumo	$NS = \left(\frac{\sum Q_{desp}}{\sum Q_{sol}} \right) * 100$	%	Mensual	Kardex + OT

Indicador	Definición operativa	Fórmula	Unidad	Periodicidad	Fuente mínima
Tasa de quiebre	Frecuencia de eventos en los que el ítem requerido no estuvo disponible	$TQ = \frac{N_{quiebres}}{N_{solicitudes}} * 100$	%	Mensual	OT + registro de faltantes
Tiempo promedio de reposición	Promedio del lead time real desde solicitud/OC hasta recepción física	$LT \text{ Promedio} = \frac{\sum (Fecha \text{ de entrega} - Fecha \text{ de pedido})}{\text{Número total de pedidos}}$	Días	Mensual	Compras + Bodega
Rotación de inventario	Velocidad de consumo respecto al inventario promedio mantenido	$Rot = \frac{\text{consumo anual}}{\text{Inventario promedio}}$	1/año	Trimestral	Kardex + valorización
Capital inmovilizado	Valor monetario del stock existente en bodega	$CI = \sum_i (P_i * Q_{stock,i})$	USD	Mensual	Inventario valorizado
Obsolescencia	Proporción del valor de inventario sin movimiento (según ventana definida)	$Obs = \frac{V_{sin\ mov}}{V_{total}}$	%	Trimestral	Kardex (último movimiento)

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

En términos de operacionalización, Q_{sol} representa las cantidades requeridas por mantenimiento (según la OT y los requerimientos), mientras que Q_{desp} corresponde a las cantidades efectivamente entregadas desde la bodega. Por su parte, para el indicador de quiebre, $N_{quiebres}$ se contabiliza únicamente cuando existe evidencia de indisponibilidad, la cual está registrada como reprogramación, pendiente o demora por falta de stock. En efecto, en los reportes revisados, esta condición aparece explícitamente en frases como “no tenía ... en stock”, “no lo tiene en stock” o “no se tenía en bodega”, y se manifiesta ya sea como

reprogramación, pendiente o extensión de horas, de modo que constituye un evento observable del diagnóstico.

De forma complementaria, el lead time se calcula con marcas temporales verificables: la fecha de solicitud o de la orden de compra (t_{sol}) y la fecha de recepción en bodega (t_{rec}). Cabe señalar que, en el material documental de la empresa ya se observa que los tiempos de abastecimiento pueden consignarse en los reportes (por ejemplo, referencias a días esperados de llegada), pero para evitar inferencias, dicho indicador se cerrará únicamente con fechas de compra/recepciones registradas por el área de Compras y la Bodega, conforme al flujo AS-IS del proceso de abastecimiento.

La Tabla 10 consolida los valores cuantificados de la línea base AS-IS, vinculados con las metas del sistema propuesto (Capítulo III). Esta referencia cruzada facilita la comparación objetiva entre escenarios.

Tabla 10 Línea base AS-IS con referencia cruzada a metas TO-BE.

Indicador	Valor AS-IS	Fuente	Meta TO-BE (Cap. III)
Nivel de servicio (NS)	72,3 %	Bitácora Bodega (3 meses)	≥ 98 % alta; ≥ 85 % baja
Tasa de quiebre (TQ)	27,7 %	Complemento del NS	≤ 2 % alta; ≤ 15 % baja
Rotación de inventario	1,84 veces/año	Consumo / Inv. promedio	A: ≥ 4 ; B: ≥ 2 ; C: ≥ 1
Capital inmovilizado	\$265.104	Saldos Kardex	Reducción 15–20 %
Trazabilidad OT-inv.	34,2 %	Auditoría 50 OT	100 %
Horas perdidas	44,7 h/mes	Registro manual OT	< 10 h/mes (≥ 80 %)
Lead time reposición	60–90 días (import.)	Reportes internos	≤ 45 días

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Análisis de causa raíz del desempeño del inventario

El análisis de causa raíz se fundamenta en dos elementos verificables del diagnóstico: (i) el flujo AS-IS de abastecimiento, donde la verificación de stock define tanto la continuidad del mantenimiento como el inicio del ciclo de compra (“Stock disponible / No en stock”), y (ii) los eventos documentados en los reportes del taller, en los que se registran reprogramaciones, extensiones de horas y actividades pendientes por faltantes de repuestos en bodega.

En el proceso vigente, la Bodega concentra tanto la verificación de stock, el control de inventario como la clasificación ABC, mientras que el área de Compras gestiona el abastecimiento cuando no existe disponibilidad; por tanto, cualquier quiebre se traduce en espera, en reproceso administrativo y en variación del tiempo/horómetro real de ejecución del preventivo.

Desde una perspectiva técnica, el problema no se aborda únicamente como “faltantes”, sino como una desconexión entre los datos de consumo y reposición (demanda, variabilidad y lead time), la criticidad operativa y la parametrización del control (stock de seguridad, punto de reorden, máximos y mínimos), a lo que se suma una trazabilidad insuficiente entre la OT, el consumo y el inventario. Estas relaciones constituyen tanto la base necesaria para que el diagnóstico sea explicativo (causal) y no solo descriptivo, como el fundamento para que tanto el modelo probabilístico/estocástico como la integración GMAO/CMMS se construyan sobre datos trazables.

La Figura 4 organiza las causas que explican el efecto observado: los quiebres de stock y la ejecución incompleta o reprogramada del mantenimiento preventivo en el taller de HIDRO S.A. Este efecto se evidencia, por ejemplo, cuando un filtro requerido para el preventivo no se encuentra disponible y con ello el mantenimiento se extiende en horas adicionales, o cuando también se reprograma el servicio por la ausencia de consumibles.

En la categoría del Método, dicha causa se describe como la ausencia de un esquema sistemático que conecte la demanda histórica, los tiempos de entrega, la criticidad y el cálculo de parámetros de control (SS, PR, máximos y mínimos). De hecho, en el flujo actual, la decisión “No en stock” activa el proceso de compra (cotización–selección–OC–recepción), lo que es coherente con una reposición reactiva; por ello, el quiebre se convierte en un disparador de compra y no en un evento prevenible por una adecuada parametrización.

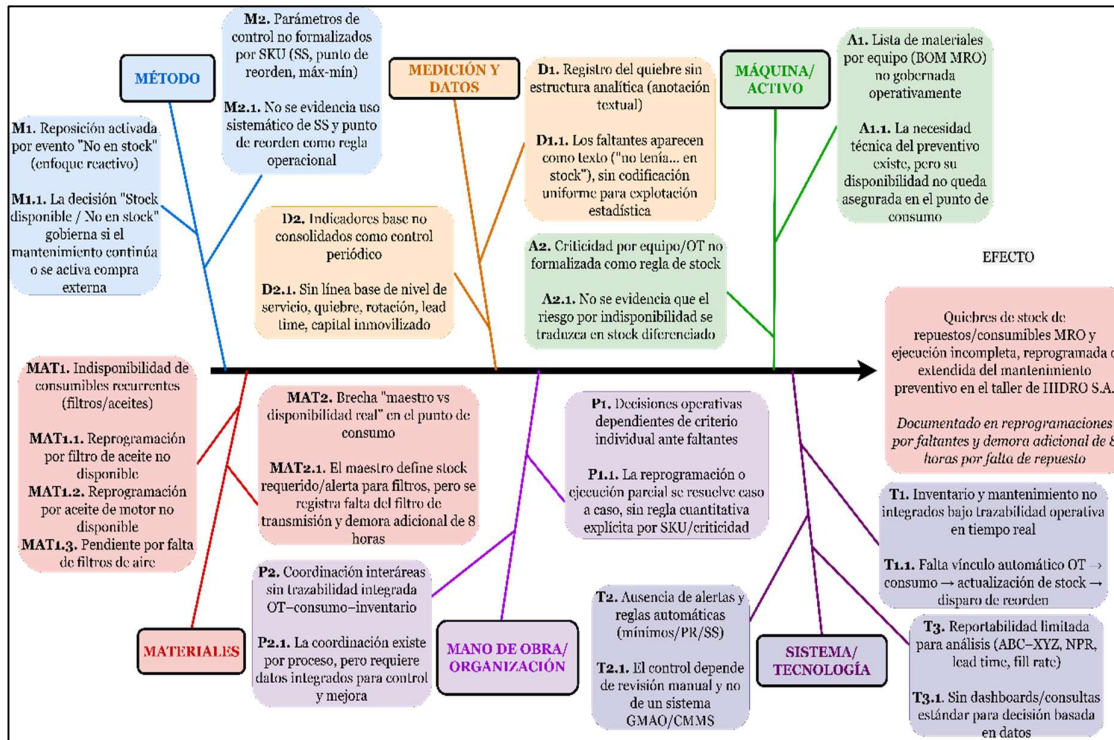


Figura 4 Diagrama Ishikawa (causas) del proceso de mantenimiento.
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

En la categoría de Medición/Datos, esta causa se sustenta en que los eventos de quiebre aparecen en reportes como notas de observación (reprogramación, espera, pendiente), pero este registro no garantiza, por sí mismo, la disponibilidad de variables estructuradas para calcular variabilidad, distribución estadística, lead time, stock de seguridad y punto de reorden. Por lo tanto, sin métricas base (nivel de servicio, rotación, tiempo promedio de reposición, tasa de quiebre, obsolescencia y capital inmovilizado), la mejora posterior no puede demostrarse con indicadores comparables.

En la categoría de Máquina/Activo, dicha causa se asocia a que los requerimientos del preventivo (lista de materiales por intervención) no quedan gobernados operativamente por un control que garantice la disponibilidad en el punto de consumo. Esto se evidencia cuando un mantenimiento se ejecuta, pero una actividad crítica queda sin realizar por un faltante en bodega, quedando registrada como observación del tipo “no se recibe” o “no se realiza el cambio... (llegará en 5 días)”.

En la categoría de Materiales, la causa se verifica mediante la brecha “maestro vs disponibilidad real”. Concretamente, el maestro de filtros de la retroexcavadora XC8-C2570 define las cantidades requeridas en stock y los umbrales de alerta para filtros críticos (incluido el filtro de transmisión); sin embargo, el reporte de mantenimiento de 500 horas documenta

que dicho filtro de transmisión no estaba en stock y que el mantenimiento demoró 8 horas adicionales. En consecuencia, esta evidencia confirma que el control definido en el maestro no se refleja necesariamente en el stock disponible al momento de llevar a cabo la intervención.

En las categorías de Mano de obra y Sistema/Tecnología, dicha causa se enfoca en la coordinación y la trazabilidad interáreas. En efecto, el proceso formal reconoce que la Bodega realiza control de inventario y registro de consumos, así que existe “ingreso al sistema” en la recepción; sin embargo, para soportar un control por nivel de servicio y un modelo estocástico, se requiere explicitar tanto el flujo de información OT, consumo, inventario como los requisitos funcionales para trazabilidad en tiempo real (propósito que se aborda mediante GMAO/CMMS en la propuesta). Por lo tanto, la causa raíz no se atribuye a personas, sino al diseño del sistema de información y a su capacidad de capturar datos completos y reutilizables para la decisión.

La Figura 5 estructura el problema central como una gestión del inventario MRO sin control cuantitativo suficiente para asegurar la continuidad del mantenimiento preventivo. Este problema se manifiesta cuando la ejecución del mantenimiento queda subordinada a la existencia del repuesto en bodega, lo cual genera tanto reprogramaciones por faltantes de filtro o aceite como actividades pendientes por la ausencia de ítems, aun pese a tratarse de consumibles recurrentes.

Como causas directas se identifican tres puntos. En primer lugar, la disponibilidad insuficiente de ítems básicos en el punto de consumo, lo cual activa el ramal “No en stock” del flujo y, por tanto, incrementa el tiempo total hasta disponer del repuesto. En segundo lugar, la falta de parametrización de reposición basada en datos (demanda, variabilidad y lead time) para calcular el stock de seguridad y el punto de reorden. Finalmente, la trazabilidad incompleta entre la OT, el consumo y el inventario, lo que limita el uso del historial para controlar el riesgo de quiebres y priorizar la criticidad. En conjunto, estas causas se conectan directamente con los datos mínimos exigidos para construir el modelo probabilístico/estocástico y con la necesidad de integración GMAO/CMMS.

Los efectos documentados muestran tres manifestaciones claras: las reprogramaciones del mantenimiento por los faltantes, las actividades que quedan pendientes y las extensiones en el tiempo de intervención. En términos de desempeño, estos efectos representan una pérdida de control sobre la ventana de mantenimiento, la generación de tiempos improductivos por la espera de abastecimiento y la presión operativa para realizar compras urgentes cuando el flujo activa la ruta "No en stock".

Con base en este análisis causal, el diagnóstico define con precisión los elementos que debe consolidar la propuesta: la parametrización de los niveles SS/PR (stock de seguridad y

punto de reorden) con base en la demanda y el lead time; la clasificación ABC-XYZ de los ítems, junto con su priorización por criticidad; y la integración de los flujos OT (órdenes de trabajo), consumo e inventario mediante un sistema GMAO/CMMS. El objetivo de esta integración es sostener la trazabilidad completa y generar indicadores consistentes y comparables en el tiempo.

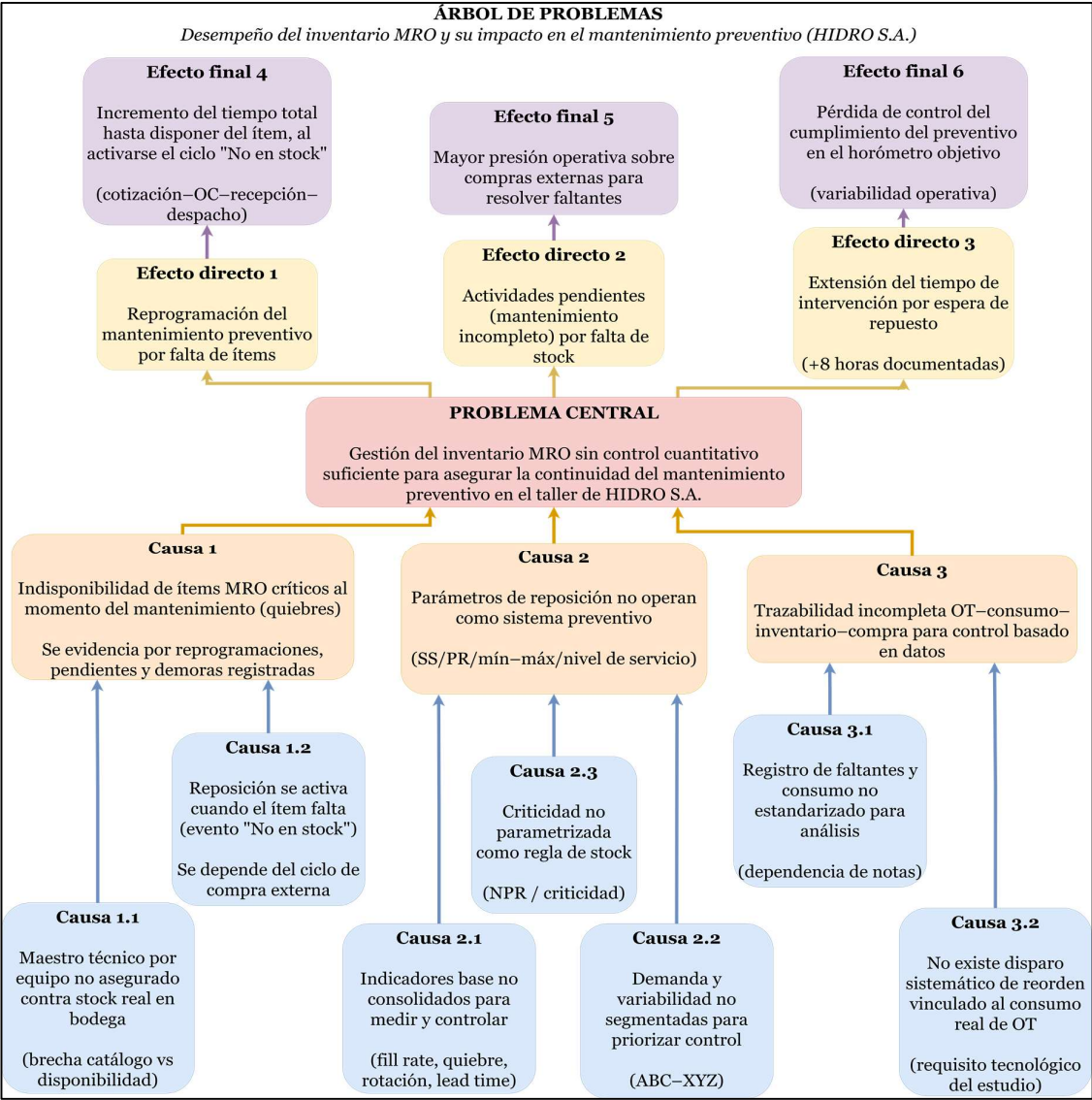


Figura 5 *Árbol de problemas (causas-problema-efectos).*
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Brechas técnicas del proceso actual frente al sistema requerido

El proceso vigente declara una coordinación entre las áreas de Operaciones, Mantenimiento, Bodega, Compras, los Proveedores y Finanzas. En este esquema, Mantenimiento define los requerimientos y Bodega verifica el stock, controla el inventario,

aplica una clasificación ABC y registra los consumos. Además, el flujo separa explícitamente la decisión de “stock disponible” frente a “no disponible en stock”, lo que activa una solicitud de repuestos y la emisión de órdenes de compra cuando el ítem no se encuentra disponible.

Sin embargo, la evidencia operativa revela que la mera existencia de un flujo y de roles definidos no garantiza un buen desempeño. Esta afirmación se sustenta en el registro recurrente de actividades pendientes por falta de stock, como es el caso de los filtros de aire. Dicha situación confirma dos fallas críticas en el proceso. En primer lugar, la continuidad del mantenimiento preventivo queda supeditada a las rupturas de stock en bodega. En segundo término, la respuesta del sistema sigue siendo reactiva, ya que se limita a esperar el repuesto faltante para poder completar la intervención.

Este comportamiento es síntoma de una brecha técnica central. En la documentación analizada no se observa una parametrización demostrable de los niveles de SS/PR (stock de seguridad y punto de reorden) basada en la demanda histórica y el lead time real. Tampoco existe un esquema integrado de datos que conecte las órdenes de trabajo (OT), el consumo y los inventarios, lo cual es indispensable para medir métricas clave como el nivel de servicio, la tasa de quiebre o el tiempo real de reposición. Estos dos elementos, específicamente una parametrización confiable y un esquema de datos integrado, constituyen los insumos mínimos para construir y validar el modelo central del proyecto. Dicho modelo debe sustentarse en una clasificación ABC-XYZ robusta, un análisis de la estocasticidad de la demanda y una trazabilidad completa de los materiales.

Con base en lo anterior, en la Tabla 11 se sintetizan las brechas técnicas identificadas entre el sistema actual (AS-IS) y el sistema requerido. Dicha tabla no solo resume “qué falta”, sino que vincula cada una de estas brechas con la variable correspondiente que deberá estimarse o gestionarse en los siguientes apartados: la línea base, los indicadores, la clasificación ABC-XYZ-NPR, el modelo probabilístico o estocástico y la integración con el sistema GMAO/CMMS. De este modo, se asegura la trazabilidad metodológica desde el diagnóstico hasta el diseño del estado futuro (TO-BE).

Tabla 11 Brechas técnicas del AS-IS (HIDRO S.A.) frente al sistema requerido.

Componente requerido	Evidencia en la operación (taller)	Brecha técnica	Variable del modelo afectado
Continuidad del preventivo por disponibilidad	Pendientes / reprogramaciones por faltantes (stockout)	No existe control verificable por nivel de servicio para asegurar	NS, TQ

Componente requerido	Evidencia en la operación (taller)	Brecha técnica	Variable del modelo afectado
		continuidad del preventivo	
Parametrización de inventario	Faltantes se evidencian sin parámetros demostrables	No se evidencia cálculo y gobierno de SS y PR/ROP con demanda y lead time	SS, PR/ROP, LT
Clasificación ABC-XYZ-NPR	Faltan ítems simples pero críticos (filtros/aceites)	No se aplica ni se documenta clasificación cuantitativa para priorizar control	Clase ABC, XYZ, NPR
Gestión de datos e indicadores	No se observa línea base cuantificada en el diagnóstico	No se consolida consumo, rotación, quiebre, costo y reposición como base de medición	Consumo, Rotación, LT, Obsolescencia, CI
Trazabilidad OT-consumo-inventario	Dependencia de registros manuales / desconexión entre áreas	No existe trazabilidad en tiempo real ni flujo de información formalizado para GMAO/CMMS	Trazabilidad, registros por OT

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Hallazgos y requerimientos del sistema

El diagnóstico documental confirma que HIDRO S.A. dispone de un flujo AS-IS de abastecimiento en el que la continuidad del mantenimiento depende de una decisión binaria de disponibilidad (“stock disponible” o “no en stock”). Así, ante un faltante, se activa el ciclo de compra externa (solicitud, cotización, orden de compra, recepción, ingreso y despacho). En términos de control, este diseño formaliza solo la reacción ante el faltante, pero no evidencia ningún mecanismo operativo que prevenga el quiebre con base en parámetros cuantitativos por cada ítem (Proceso de abastecimiento).

La evidencia operativa revisada en los reportes de mantenimiento valida que los quiebres de stock ocurren en el punto de consumo y se traducen en impactos medibles sobre el mantenimiento preventivo. En particular, se registra una demora adicional de 8 horas por la indisponibilidad de un filtro de transmisión en la retroexcavadora XC8-C2570, así como reprogramaciones y actividades pendientes asociadas a los faltantes de filtro, aceite y filtros de aire en la cargadora. Estos eventos constituyen evidencia directa de que la ejecución del mantenimiento preventivo queda subordinada a la disponibilidad real del inventario MRO, con

consecuencias operativas como la reprogramación, la intervención extendida y las actividades pendientes.

Con base en estos hallazgos, el sistema requerido por el estudio no se define como “mejorar la bodega” en términos generales, sino como un sistema de gestión cuantitativa del inventario MRO que permita: (i) medir el desempeño con indicadores verificables; (ii) segmentar los ítems para decisiones diferenciadas (ABC-XYZ y criticidad/NPR); (iii) parametrizar la reposición (SS y PR/ROP) considerando la demanda y el lead time reales; y (iv) asegurar la trazabilidad OT, consumo, inventario con el soporte GMAO/CMMS. Para formalizarlo, la Tabla 12 establece los requerimientos técnicos mínimos, los datos imprescindibles y el criterio de verificación asociado, asegurando la continuidad metodológica hacia el diseño TO-BE y la evaluación de mejora.

Tabla 12: Requerimientos técnicos del sistema propuesto derivados del diagnóstico en HIDRO S.A.

Requerimiento del sistema	Especificación técnica	Variable(s) del modelo	Datos mínimos imprescindibles	Fuente interna mínima	Criterio de verificación
R1. Medición del nivel de servicio	Medir demanda atendida sin quiebre por ítem y período (fill rate)	NS	Q_{sol} , Q_{desp} por SKU y mes	OT + kardex	NS mensual calculable sin vacíos de datos
R2. Registro estructurado del quiebre	Definir quiebre como evento donde $(Q_{\{desp\}} < Q_{\{sol\}})$ o “no stock” documentado	TQ, eventos	Conteo N_{sol} , $N_{quiebres}$, fecha, SKU, OT, equipo	OT + notas + kardex	TQ mensual calculable y trazable a OT
R3. Caracterización del lead time real	Estimar lead time promedio y dispersión por familia/SKU	LT, (σ_{LT})	Fecha solicitud/OC, fecha recepción (por orden)	Compras + recepción bodega	(LT) calculable por historial ($n \geq m$)
R4. Normalización del maestro MRO	Unificar SKU– descripción–número de parte (original/alternativo) y BOM por equipo	Catálogo, BOM	SKU único, #parte, equivalencias, equipo asociado	Maestro de filtros/aceites + inventario	Sin duplicidades funcionales en catálogo
R5. Clasificación ABC	Segmentar por valor anual de consumo ($P_i \cdot D_i$)	Clase ABC	Costo unitario P_i , consumo anual D_i	Inventario valorizado	ABC reproducible y auditable
R6. Clasificación XYZ	Segmentar por variabilidad de demanda (intermitencia/variación)	Clase XYZ	Consumo mensual histórico por SKU	Kardex/Inventario H	XYZ calculable con serie

Requerimiento del sistema	Especificación técnica	Variable(s) del modelo	Datos mínimos imprescindibles	Fuente interna mínima	Criterio de verificación
					mensual completa
R7. Criticidad/NPR	Priorizar por criticidad (impacto de no disponibilidad) vinculada a OT/equipo	NPR	SKU–equipo, modo de falla/uso, impacto operativo	OT + criterios del estudio	NPR documentado y usado en reglas
R8. Parámetros de reposición	Calcular SS y PR/ROP por ítem según demanda y LT	SS, PR/ROP	Demanda, variabilidad, LT, nivel objetivo	Indicadores R1–R3	Parámetros definidos por SKU crítico
R9. Trazabilidad OT–consumo–inventario	Cada salida de bodega debe asociarse a OT, equipo y fecha; actualiza stock	Trazabilidad	OT, SKU, qty, responsable, fecha, equipo	GMAO/CMMS o registro equivalente	Consumo reconstruible por OT y equipo
R10. Control económico	Cuantificar capital inmovilizado y obsolescencia por ventana de no movimiento	CI, Obs	Stock on-hand, costo, fecha último movimiento	Inventario valorizado + kardex	CI/Obs calculables por período
R11. Reportabilidad para decisión	Tableros/listados mínimos para control: quiebres, NS, LT, ABC-XYZ, críticos	Todos	Exportables mensuales (CSV/Excel)	GMAO/CMMS o consolidación	Reportes mensuales estándar generables

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Área de estudio

El presente estudio se enmarca en las líneas institucionales de investigación definidas para los programas de posgrado. En particular, por su objeto de análisis y por el tipo de solución propuesta, la investigación se alinea con la Línea de Investigación: Sistemas Industriales, la cual incluye de forma explícita la logística y el mantenimiento como parte del enfoque de mejora de los sistemas productivos.

Este encuadre es pertinente porque el trabajo aborda la optimización del inventario MRO que soporta el mantenimiento preventivo, integrando el flujo operativo entre el mantenimiento, la bodega y las compras, así como el soporte tecnológico (GMAO/CMMS) para su control y trazabilidad. En consecuencia, la Tabla 13 presenta la delimitación formal del área de estudio, conforme a los componentes institucionales.

Tabla 13 *Área de estudio.*

Área de estudio	Delimitación del objeto de estudio
Dominio	Tecnología y Sociedad
Línea de investigación	Sistemas Industriales
Sub-línea de investigación	Producción, análisis, diseño, simulación, logística, validación, P+L1, mantenimiento y mejora de sistemas productivos combinando calidad, costo y tiempos de entrega oportunos.
Campo	Ingeniería Industrial
Área	Procesos
Aspectos	Gestión de inventarios MRO
Objeto de estudio	Optimización del inventario MRO (taller/almacén de equipo pesado – HIDRO S.A.)
Período de análisis	2025

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Modelo operativo

En esta sección se define el modelo operativo que estructura la propuesta de optimización del inventario MRO en HIDRO S.A., al representar de forma verificable el flujo de repuestos desde el requerimiento de mantenimiento hasta su reposición. Este modelo describe a los actores involucrados, Operaciones, Mantenimiento, Bodega, Compras, Proveedores, Finanzas, y explicita los puntos de decisión que condicionan la continuidad del mantenimiento preventivo, especialmente en lo que respecta a la disponibilidad de stock.

El modelo incorpora, de igual forma, los elementos técnicos que sustentan la optimización: la demanda histórica, el lead time real, la criticidad, los parámetros de control (SS y PR/ROP) y la trazabilidad OT, consumo e inventario, con el soporte de un sistema GMAO/CMMS. Estos componentes se especifican mediante diagramas de proceso y tablas en las subsecciones siguientes, las cuales diferencian el funcionamiento actual (AS-IS) del sistema propuesto (TO-BE).

Modelo operativo actual (AS-IS)

El modelo operativo vigente en HIDRO S.A. se estructura como una cadena de abastecimiento interna orientada a sostener la continuidad operativa del mantenimiento de equipo pesado. En la documentación institucional del proceso se establece una coordinación formal entre las áreas de Operaciones, Mantenimiento, Bodega, Compras, Proveedores y Finanzas. En este esquema, el área de Mantenimiento actúa como el eje técnico al definir los requerimientos según los planes preventivos y correctivos, mientras que la Bodega controla el

inventario, aplica una clasificación ABC y registra los consumos. Cuando no existe stock, el área de Compras gestiona el abastecimiento externo, y el área de Finanzas asegura el control presupuestario y los pagos.

No obstante, el desempeño real del modelo AS-IS queda condicionado por la disponibilidad efectiva en bodega en el momento de la decisión binaria “stock disponible o no disponible en stock”. Esta condición se observa en los reportes del taller, donde la ejecución del mantenimiento preventivo se reprograma o se extiende por faltantes; por ejemplo, se documenta una demora adicional de 8 horas por no disponer del filtro de aceite de transmisión, así como reprogramaciones por no contar con el filtro de aceite o con el aceite de motor en stock.

Con el fin de representar el funcionamiento real del sistema y sus dependencias, la Figura 6 modela el estado AS-IS como una red de nodos (los cuales representan las áreas) y arcos (los cuales representan los flujos documentales u operativos). En dicha red, el nodo de Bodega–Almacén concentra el punto crítico de decisión “stock disponible o no disponible en stock”, el cual define si el flujo continúa como un despacho interno o si se activa el ciclo de compras y recepción. Esta lógica corresponde tanto al flujo como a los roles descritos en el proceso institucional.

A partir del diagrama de red, se identifican los puntos donde el sistema se vuelve sensible a quiebres y demoras, por ejemplo, debido a la disponibilidad física, a la variabilidad del lead time o a los rezagos administrativos. Para focalizar el diagnóstico operativo sin duplicar las métricas, las cuales ya están desarrolladas en la sección de indicadores, la Tabla 14 resume los puntos críticos, el riesgo asociado y la trazabilidad mínima requerida para que el modelo (ABC-XYZ, SS/PR y lead time) pueda parametrizarse con datos verificables.

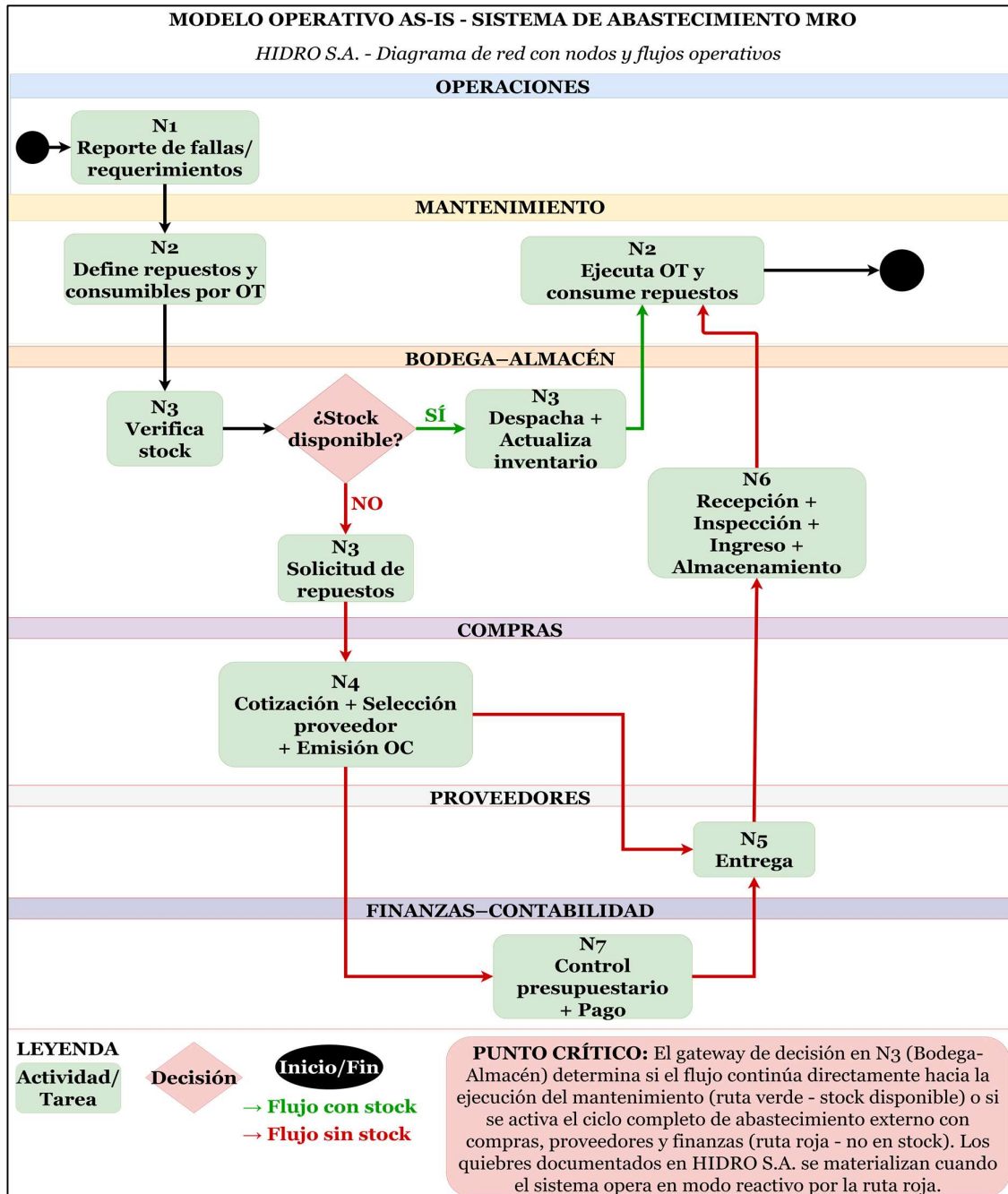


Figura 6 Diagrama de red AS-IS (componentes y flujos reales del repuesto).
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Tabla 14 *Puntos críticos del AS-IS y riesgo operativo asociado.*

Punto crítico	Etapas / responsable	Riesgo operativo observable	Registro mínimo trazable (dato)
PC1	Verificación de stock (Bodega)	Diferencia entre stock planificado y stock real (quiebre en el punto de consumo)	saldo disponible, saldo comprometido, fecha/hora verificación, ítem/código
PC2	Solicitud y emisión de OC (Compras)	Variabilidad del lead time y demoras por cotización/aprobación	fecha solicitud, fecha OC, proveedor, fecha compromiso, lead time histórico
PC3	Recepción e ingreso (Bodega)	Rezago administrativo que posterga disponibilidad aun con entrega física	fecha recepción, cantidad recibida, discrepancias, fecha ingreso a sistema
PC4	Despacho y consumo (Bodega– Mantenimiento)	Consumo sin registro oportuno, distorsiona demanda histórica y reposición	OT, equipo, fecha consumo, cantidad consumida, responsable, saldo post-consumo

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Modelo operativo propuesto (TO-BE) del sistema de inventarios

El modelo TO-BE se diseña como un sistema integral de inventarios MRO, el cual se articula con las áreas de mantenimiento y compras. Su propósito es reducir los quiebres de stock y estabilizar la ejecución del mantenimiento preventivo. Para ello, el control deja de ser reactivo y pasa a basarse en parámetros definidos para cada ítem. Dichos parámetros se calculan a partir de la demanda histórica, de su variabilidad y de la incertidumbre de entrega. El sistema incorpora también la trazabilidad OT–consumo–inventario para registrar cada movimiento. En la Figura 7 se presenta la arquitectura del proceso, así como las entradas, los módulos y las salidas del sistema.

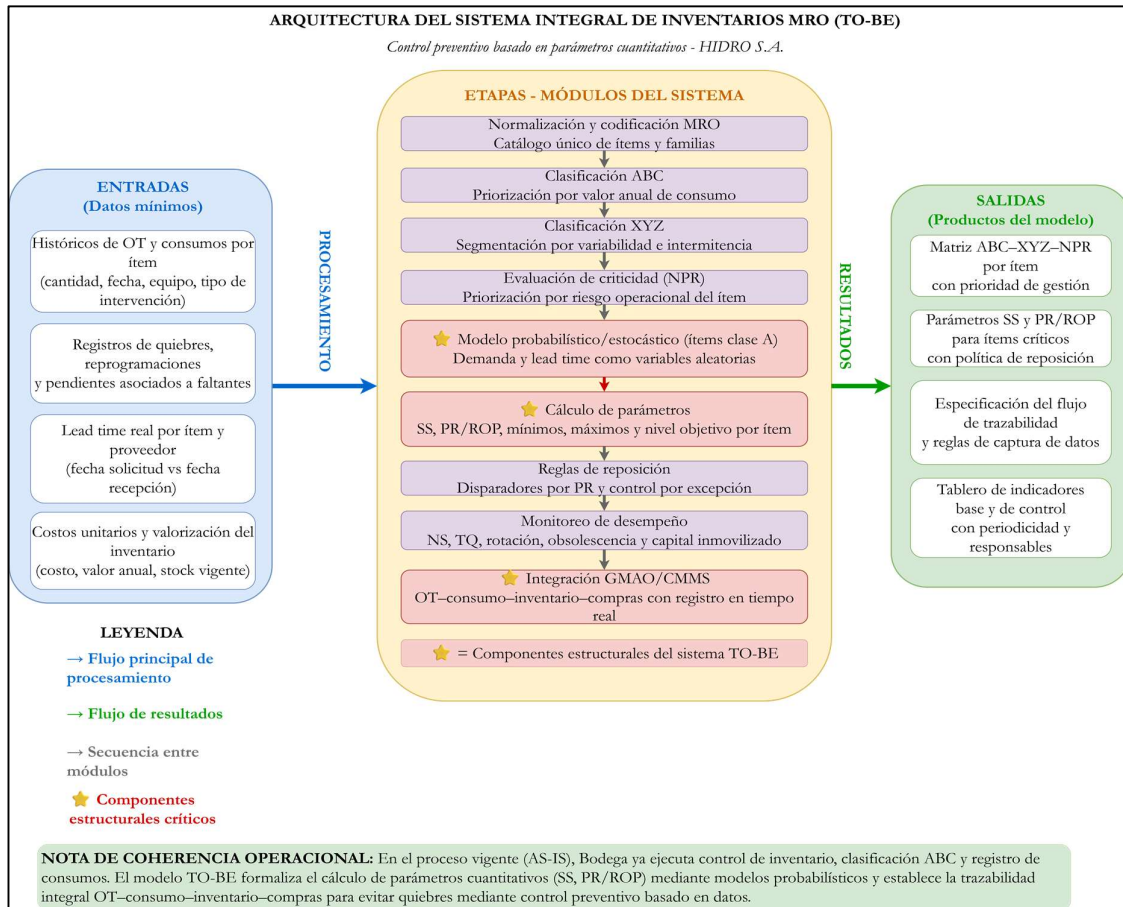


Figura 7 Arquitectura del proceso TO-BE.

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Flujo de información mantenimiento → inventario → compras (trazabilidad)

El desempeño del inventario depende de la calidad de los datos operativos capturados en cada punto del flujo. Por ello, el sistema define qué se registra, quién lo registra y en qué momento. En el proceso vigente, la Bodega verifica el stock, realiza los despachos y actualiza el inventario; además, registra el consumo y aplica una clasificación ABC. Sin embargo, para asegurar la trazabilidad, cada consumo debe quedar ligado a una OT, a un equipo y a un ítem codificado. Esta relación permite reconstruir la demanda real por repuesto y medir los quiebres con consistencia.

La Figura 8 describe el flujo de información como una secuencia trazable, desde la generación de la OT hasta la reposición. Este flujo separa tres eventos clave: (i) la solicitud técnica, (ii) el movimiento físico y (iii) el movimiento de datos. Cuando estas tres capas no están sincronizadas, aparecen discrepancias entre el stock teórico y el stock real. En

consecuencia, el diseño prioriza los registros mínimos obligatorios y las validaciones simples. El diseño incluye un diccionario de datos destinado a eliminar las descripciones libres.

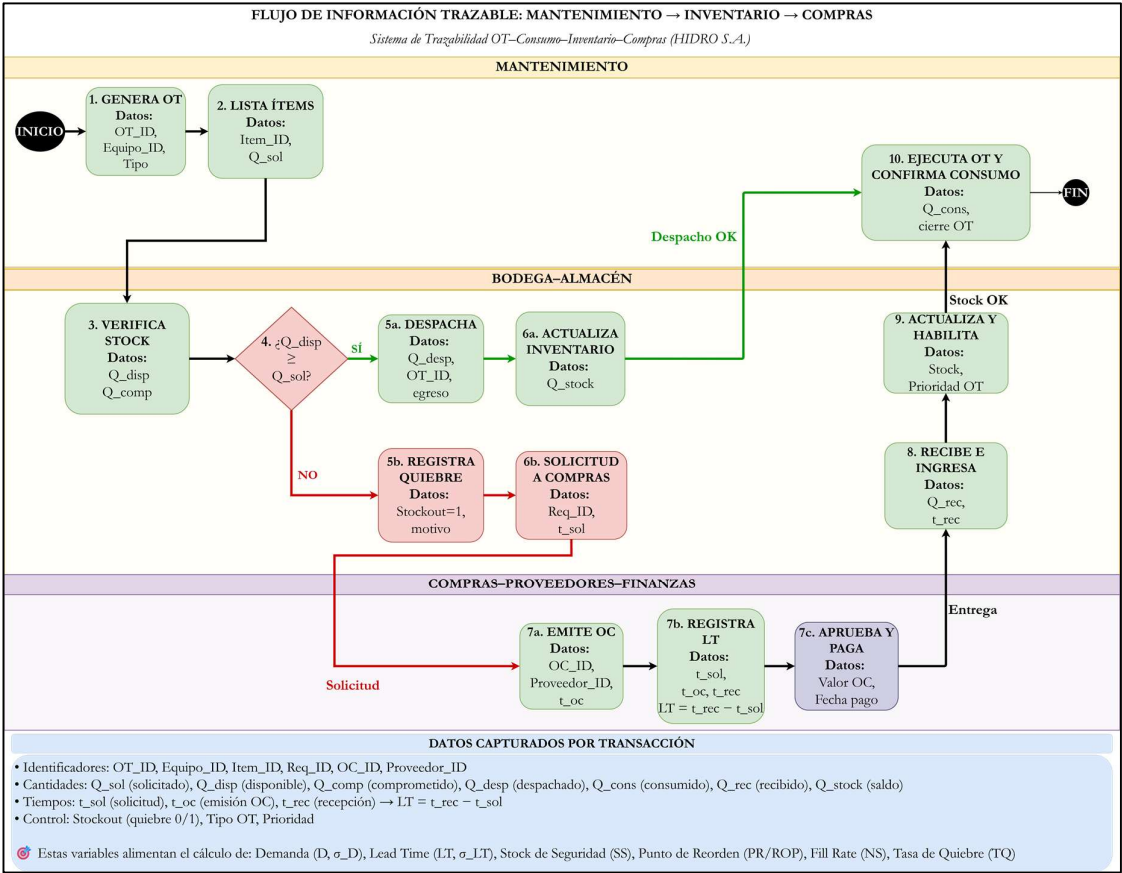


Figura 8 *Flujo de información trazable.*
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Para garantizar una interpretación unívoca de las variables utilizadas en el flujo, como las cantidades, los tiempos y los identificadores, la Tabla 15 presenta la nomenclatura mínima y su fuente de captura dentro del proceso.

Tabla 15 *Nomenclatura de variables del flujo de trazabilidad OT-inventario-compras.*

Variable	Definición operativa	Unidad	Fuente de captura (área/sistema)
(OT_ID)	Identificador único de orden de trabajo	—	Mantenimiento (GMAO/CMMS)
(Equipo_ID)	Identificador del activo intervenido (equipo/serie)	—	Mantenimiento (GMAO/CMMS)
(Item_ID)	Identificador codificado del repuesto/consumible	—	Catálogo MRO (GMAO/Inventario)

Variable	Definición operativa	Unidad	Fuente de captura (área/sistema)
(Q_{sol})	Cantidad solicitada del ítem para la OT	unid.	Mantenimiento (GMAO/CMMS)
(Q_{disp})	Stock disponible del ítem al momento de verificación	unid.	Bodega (Inventario/GMAO)
(Q_{comp})	Stock comprometido (reservado/no liberado) del ítem	unid.	Bodega (Inventario/GMAO)
(Q_{desp})	Cantidad despachada desde bodega a la OT	unid.	Bodega (Inventario/GMAO)
(Q_{cons})	Cantidad consumida real imputada a la OT (cierre)	unid.	Mantenimiento (GMAO/CMMS)
(Q_{rec})	Cantidad recibida por bodega desde proveedor	unid.	Bodega (Recepción/Inventario)
(Q_{stock})	Stock en existencia (saldo posterior a movimiento)	unid.	Bodega (Inventario/GMAO)
(Stockout)	Variable binaria de quiebre (1 si no hay stock disponible; 0 caso contrario)	—	Bodega (Inventario/GMAO)
(Req_ID)	Identificador de solicitud interna de compra	—	Bodega/Compras
(OC_ID)	Identificador de orden de compra	—	Compras
(Proveedor_ID)	Identificador del proveedor asignado	—	Compras
(t_{sol})	Fecha/hora de solicitud de reposición (inicio del ciclo)	fecha/hora	Compras/Bodega
(t_{oc})	Fecha/hora de emisión de orden de compra	fecha/hora	Compras
(t_{rec})	Fecha/hora de recepción del ítem en bodega	fecha/hora	Bodega
(LT)	Lead time real de reposición, ($LT=t_{rec}-t_{sol}$)	días	Compras/Bodega
(P_i)	Costo unitario del ítem (i)	USD/unid.	Finanzas/Bodega

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

En la Tabla 16 se resume la matriz de captura de datos, la cual especifica la fuente, el momento y la variable correspondiente a cada componente del modelo. Esta matriz asegura que el cálculo de los parámetros SS y PR, se base en observaciones consistentes y también

reduce la dependencia de “notas” sin estructura, las cuales impiden una consolidación estadística confiable. Adicionalmente, esta herramienta habilita una auditoría cruzada entre las OT, el kardex y las compras. Por lo tanto, la necesidad de explicitar tanto el flujo de información como los requisitos de trazabilidad se considera una parte fundamental del diseño del sistema.

Tabla 16 *Matriz mínima de captura de datos para trazabilidad OT–inventario–compras.*

Dato	Quién lo genera	¿Cuándo se captura?	Dónde se registra	Variable del modelo
OT_ID, Equipo_ID, tipo OT	Mantenimiento	Apertura de OT	GMAO/CMMS	Segmentación de demanda
Item_ID, Q_sol	Mantenimiento	Solicitud de repuesto	GMAO/CMMS	Demanda (D)
Q_disp, Q_comp	Bodega	Verificación de stock	Inventario/GMAO	Estado de inventario
Q_desp, fecha egreso	Bodega	Despacho	Inventario/GMAO	Fill rate (NS)
Stockout=1, motivo	Bodega	Cuando no hay stock	Inventario/GMAO	Tasa de quiebre (TQ)
Req_ID, OC_ID, Proveedor_ID	Compras	Inicio de reposición	Compras	Lead time y proveedor
t_sol, t_rec	Compras/Bodega	Solicitud y recepción	Compras + Inventario	LT y su variabilidad
P_i, valor anual	Finanzas/Bodega	Valorización mensual	Inventario valorizado	CI y ABC
Q_cons, cierre OT	Mantenimiento	Cierre de OT	GMAO/CMMS	Consumo real y rotación

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Requerimientos funcionales para GMAO/CMMS

La integración de un sistema GMAO/CMMS se establece como un requisito funcional del modelo TO-BE, debido a que la propuesta depende de registros consistentes y trazables para controlar el inventario MRO. Su finalidad es asegurar que el consumo de repuestos y consumibles quede vinculado a una OT, a un equipo y a un ítem codificado, evitando así distorsiones entre el stock teórico y el stock real. Además, el sistema debe habilitar la explotación de los datos para estimar la demanda y el lead time reales y, con ello, calcular los parámetros de control, como el stock de seguridad (SS) y el punto de reorden (PR/ROP), para cada ítem.

Desde el punto de vista operativo, el sistema GMAO/CMMS debe actuar como el núcleo de integración entre tres dominios: el mantenimiento (OT–BOM–consumo), el inventario (kardex–parámetros–alertas) y las compras (solicitud–OC–recepción). Esta integración exige que las transacciones queden registradas en tiempo real y con responsables identificables, de modo que los indicadores base (el nivel de servicio (NS), la tasa de quiebre (TQ), el lead time (LT), la rotación, la obsolescencia y el capital inmovilizado) puedan calcularse con periodicidad y compararse antes y después de la intervención. La Tabla 17 consolida los requerimientos mínimos que garantizan dicha trazabilidad y habilitan la modelación probabilística o estocástica de la demanda y del lead time.

Tabla 17 *Requerimientos funcionales mínimos del GMAO/CMMS para inventarios MRO.*

Código	Requerimiento funcional	Alcance mínimo verificable	Datos/variables habilitadas
RF-01	Catálogo MRO unificado	Codificación única, equivalencias (original/alterno), unidad de medida y familia	Item_ID, unidad, equivalencias, familia ABC/XYZ
RF-02	Gestión de OT	Creación, planificación, BOM/ítems requeridos, cierre y evidencias	OT_ID, Equipo_ID, Item_ID, (Q_{sol})
RF-03	Registro de consumos por OT	Imputación de salida a OT y equipo, con cantidades y fecha	(Q_{desp}), (Q_{cons}), fecha egreso, responsable
RF-04	Kardex en tiempo real	Entradas/salidas con usuario, fecha, ubicación y saldo	(Q_{rec}), (Q_{stock}), ubicación, bitácora
RF-05	Parámetros por ítem	SS, PR/ROP, mínimos, máximos y niveles objetivo	SS, PR/ROP, min–max, niveles objetivo
RF-06	Disparador de reposición	Alerta y/o solicitud automática al cruzar PR/ROP	señal de reposición, Req_ID, umbral PR
RF-07	Lead time real	Cálculo automático desde solicitud/OC hasta recepción	(t_{sol}), (t_{oc}), (t_{rec}), (LT)
RF-08	Indicadores	NS, TQ, rotación, obsolescencia y capital inmovilizado	NS, TQ, Rot, Obs, CI
RF-09	Auditoría y trazabilidad	Bitácora de cambios y responsables por transacción	usuario, timestamp, historial de cambios

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Para representar la integración funcional entre los módulos y los flujos, la Figura 9 describe el mapa CMMS–Inventario–Compras. En esta figura, las llaves de integración son el identificador de OT (OT_ID) y el código del ítem (Item_ID), ya que permiten enlazar el consumo, el saldo y la reposición en un mismo rastro de datos.

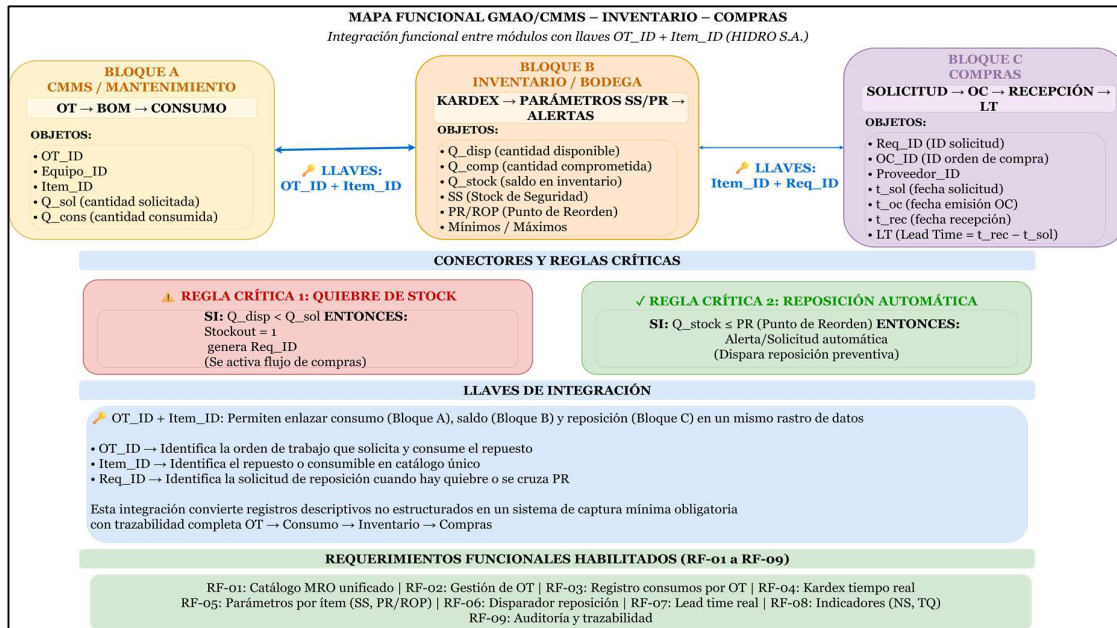


Figura 9 Mapa funcional CMMS–Inventario–Compras.
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Con estos requerimientos, la trazabilidad deja de depender de registros descriptivos no estructurados y se convierte en un sistema de captura mínima obligatoria, el cual es suficiente para controlar el inventario MRO con parámetros cuantificados por ítem y con una medición continua del desempeño.

Desarrollo del modelo operativo

El modelo operativo se desarrolla como un procedimiento aplicado al inventario MRO del taller de equipo pesado de HIDRO S.A. Su propósito es transformar datos históricos en una segmentación del catálogo (ABC-XYZ), una priorización por criticidad (NPR) y parámetros de reposición por ítem (SS, PR/ROP, mínimos y máximos), integrables a un sistema de control y medibles mediante indicadores. Esta sección describe el proceso de forma secuencial y verificable, de modo que cada salida del modelo se traduzca en reglas operativas de reposición y control del inventario.

La base cuantitativa utilizada proviene del inventario valorizado y del consumo por ítem, los cuales constituyen la línea base para calcular el valor anual de consumo, la variabilidad o intermitencia y el dimensionamiento del inventario. La Tabla 18 resume la magnitud del conjunto analizado, evidenciando un catálogo de 60 ítems con un consumo anual total de 5.748 unidades y un valor anual agregado de 493,814 USD. El rango de costo unitario, el cual varía entre 8,7 y 7.245,4 USD, confirma la heterogeneidad del portafolio y sustenta la necesidad de políticas diferenciadas por segmento.

Tabla 18 *Resumen de la base cuantitativa de inventario (línea base).*

items	Total_consumo_a nual_unid	Total_valor_anual_US D	Costo_unitario_min_U SD	Costo_unitario_ma x_USD
0	5748	493814	8.7	7245.4

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La Figura 10 esquematiza el modelo operativo como una secuencia de ocho fases interdependientes, cada una estructurada mediante entradas definidas, actividades específicas y salidas verificables. El flujo inicia con la depuración del catálogo MRO (Fase 1), avanza por la clasificación ABC-XYZ (Fase 2) y la priorización NPR (Fase 3), continúa con el dimensionamiento de SS y ROP mediante modelos estocásticos y deterministas (Fase 4) y la parametrización de políticas de reposición (Fase 5), para luego implementar el sistema GMAO/CMMS con trazabilidad completa (Fase 6), activar alertas automáticas de reposición (Fase 7) y finalizar con la generación de indicadores de control y reportes de desempeño (Fase 8). Esta arquitectura transforma progresivamente los datos históricos en controles operativos ejecutables.

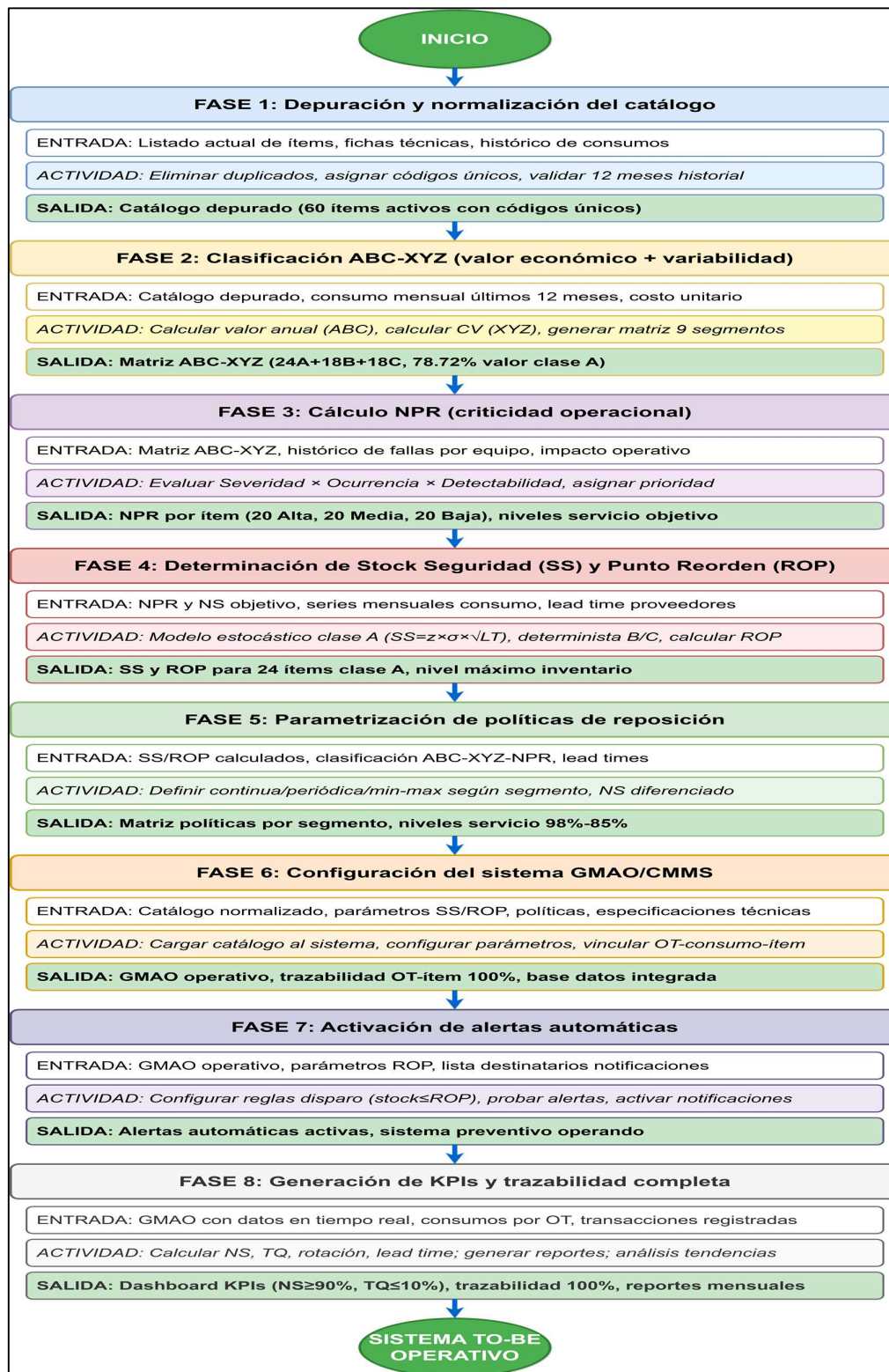


Figura 10 Flujo general del desarrollo del modelo operativo.
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Entrada del sistema

La entrada del sistema se define como la base histórica validada que alimenta el modelo operativo. Esta base integra cuatro componentes: el consumo por ítem, el lead time de proveedores, el catálogo técnico MRO y las órdenes de trabajo históricas.

Para evitar ambigüedades y asegurar la trazabilidad, cada componente debe contar con campos mínimos verificables, de manera que los cálculos posteriores de SS y PR/ROP se sustenten en registros consistentes.

Con el fin de conectar estos cuatro elementos en una estructura única y operativa, la Tabla 19 resume los campos mínimos y sus fuentes internas por componente. Esta síntesis permite validar que la información requerida existe antes de iniciar la Fase 1 del modelo.

Tabla 19 Base histórica validada de la entrada del sistema (campos mínimos).

Componente	Campos mínimos verificables	Fuente interna
Consumo por ítem	Item codificado + consumo asociado a OT	Mantenimiento (GMAO/CMMS) + Bodega (Inventario/GMAO)
Lead time proveedores	Fecha de solicitud + fecha de recepción	Compras + Bodega
Catálogo técnico MRO	Codificación única + estructura unificada	Catálogo MRO (GMAO/Inventario)
Órdenes de trabajo históricas	OT con identificador único + equipo asociado	Mantenimiento (GMAO/CMMS)

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

El consumo por ítem adquiere validez cuando queda vinculado a un ítem codificado y a una orden de trabajo, lo que permite reconstruir la demanda real por repuesto de manera consistente.

El lead time de proveedores se valida al medirse como el tiempo real entre solicitud y recepción, información fundamental para estimar plazos precisos en el cálculo de parámetros de control.

El catálogo técnico MRO resulta válido cuando cada repuesto dispone de una codificación única y una estructura unificada, condiciones que eliminan duplicidades y facilitan la segmentación posterior.

Las órdenes de trabajo históricas alcanzan su validación cuando cada intervención cuenta con un identificador único y se asocia al equipo intervenido, garantizando así la trazabilidad que sustenta la relación OT–consumo–inventario.

Fase 1: Depuración y normalización del catálogo

La fase inicial del modelo operativo corresponde a la depuración y normalización del catálogo de repuestos MRO. Su finalidad es eliminar inconsistencias, duplicidades y registros obsoletos que distorsionan el consumo, la valorización y la trazabilidad. Esta fase es determinante, porque la confiabilidad del modelo depende de la integridad del catálogo maestro. En consecuencia, los resultados de la clasificación ABC-XYZ, la priorización NPR y el dimensionamiento de parámetros de reposición se sustentan en esta validación previa.

El diagnóstico desarrollado en el Capítulo I evidenció fallas estructurales en la gestión del catálogo MRO de HIDRO S.A. Se identificaron códigos duplicados originados por registros heterogéneos de proveedores para un mismo ítem. También se observaron descripciones inconsistentes, con variaciones ortográficas y abreviaturas ambiguas, que limitan la búsqueda y el control automatizado en el ERP.

La revisión del catálogo detectó ítems con códigos antiguos y actuales coexistentes, sin consolidación del historial de consumo. Para corregir estas desviaciones, la depuración se ejecuta mediante cuatro actividades secuenciales. Dichas actividades transforman el catálogo inicial en un maestro normalizado de 60 ítems únicos validados.

Actividad 1: Eliminación de duplicidades

La identificación de duplicidades se ejecuta mediante un análisis combinado de criterios que permite detectar registros redundantes con evidencia verificable. En primer lugar, se evalúa la similitud entre descripciones técnicas mediante la distancia de Levenshtein normalizada, la cual cuantifica el número mínimo de operaciones de edición (inserción, eliminación o sustitución) necesarias para transformar una cadena en otra. Este indicador facilita la detección de variaciones ortográficas y abreviaturas que encubren ítems equivalentes.

En segundo lugar, cuando el registro dispone del número de parte OEM, se contrasta su coincidencia como criterio determinístico de equivalencia técnica. En tercer lugar, se valida la coherencia de la clasificación por familia operativa, utilizándola como condición de consistencia para confirmar que la duplicidad corresponde a un mismo grupo funcional y no a ítems distintos con denominaciones similares.

Como resultado de esta actividad, se consolidaron tres códigos duplicados del catálogo inicial. Estos casos se asociaron a ítems de rotación elevada, donde la duplicación se originó por registros independientes de proveedores que comercializan el mismo repuesto bajo denominaciones distintas. La consolidación se ejecutó manteniendo un código maestro y reasignando el historial de consumos de los códigos redundantes al registro validado,

preservando la trazabilidad del consumo y la valorización posterior. La Tabla 20 presenta el detalle de los códigos identificados y la acción de consolidación aplicada en cada caso.

Tabla 20 *Duplicados identificados y acciones de consolidación.*

Código Duplicado	Código Maestro	Descripción Duplicada	Familia	Acción
IT_001_DUP	IT_001	Filtro aceite motor	Consumible / Filtros	CONSOLIDAR → IT_001
IT_018_DUP	IT_018	Manguera retorno hydr.	Hidráulico / Mangueras	CONSOLIDAR → IT_018
IT_025_DUP	IT_025	Empaque acople hidráulico	Hidráulico / Mangueras	CONSOLIDAR → IT_025

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Actividad 2: Estandarización de códigos

Se adopta un esquema de codificación unificado para asegurar unicidad, trazabilidad y consistencia del catálogo MRO durante su uso en bodega, mantenimiento y compras. La codificación se estructura en un código tipo SKU (Stock Keeping Unit) compuesto por tres segmentos jerárquicos separados por guiones: *[CATEGORIA] – [FABRICANTE] – [NRO_{PARTE}]*.

El primer segmento identifica la categoría funcional del componente; el segundo especifica el fabricante OEM, cuando esta información se encuentra disponible; y el tercero corresponde al identificador único del ítem, derivado del número de parte del fabricante o, en su defecto, del identificador interno del sistema. Esta estructura permite rastrear el repuesto desde su función operativa hasta su referencia técnica, reduciendo ambigüedades y evitando la reincidencia de registros duplicados.

Actividad 3: Homologación de descripciones

Las descripciones técnicas se homologan mediante una plantilla de redacción estandarizada, con el propósito de asegurar coherencia terminológica y facilitar la búsqueda, identificación y trazabilidad de repuestos en los sistemas ERP y GMAO/CMMS. La normalización se aplica de forma uniforme a todo el catálogo para reducir variaciones ortográficas y semánticas que generan registros inconsistentes.

Las reglas adoptadas incluyen: (i) conversión a mayúsculas sostenidas para uniformidad en reportes y consultas, (ii) sustitución de abreviaturas ambiguas por términos completos, (iii) incorporación de especificaciones técnicas relevantes según el tipo de

componente (por ejemplo, presión nominal, caudal, voltaje, rosca, dimensiones o norma aplicable), y (iv) inclusión de la referencia OEM cuando el número de parte se encuentra disponible. Esta homologación disminuye ambigüedades en el despacho y mejora la calidad de las solicitudes y órdenes de compra.

Actividad 4: Consolidación del maestro de repuestos

El catálogo depurado se consolida en una tabla maestra que concentra los campos mínimos necesarios para soportar las fases analíticas del modelo operativo. Esta consolidación estandariza la identificación del ítem y asegura consistencia entre consumo y valorización. En particular, el valor anual de uso, variable base para la clasificación ABC, se calcula para cada ítem i mediante la siguiente ecuación.

$$V_i = P_i * D_i \quad (1)$$

Aquí, V_i es el valor anual de uso (USD/año), P_i es el costo unitario (USD/unidad) y D_i es la demanda anual (unidades/año).

Salida (Catálogo técnico normalizado de 60 ítems activos con trazabilidad completa)

El catálogo depurado y normalizado constituye la entrada validada para la Fase 2 (clasificación ABC-XYZ), al asegurar que los cálculos posteriores operen sobre registros consistentes. La línea base cuantitativa del inventario reporta un valor anual agregado de 493,814 USD para el conjunto analizado.

Tras la depuración, el valor anual total se reduce a 487.792,90 USD, diferencia explicada por dos ajustes concurrentes: (i) la eliminación de tres códigos duplicados que inflaban el consumo al registrar el mismo repuesto bajo códigos distintos y (ii) la actualización de cuatro costos unitarios desactualizados en el sistema.

La Tabla 21 presenta el catálogo técnico normalizado resultante con los 60 ítems activos, estructurado en campos mínimos que garantizan trazabilidad operativa y consistencia para la valorización y segmentación: SKU estandarizado, Item_ID, descripción técnica normalizada, familia, fabricante OEM, número de parte OEM, unidad de medida, costo unitario, demanda anual, valor anual de uso, estado y fecha de actualización. El valor anual de uso se mantiene como variable de integración con la Fase 2, en coherencia con la notación del modelo.

Tabla 21 *Muestra de 15 ítems representativos del catálogo completo de 60 ítems.*

SKU	Item_ID	Descripción Técnica	Familia	Costo Unit.	Demanda	Valor Anual
ALTERNADOR- OEM-048	IT_048	ALTERNADOR 24V	Motor / Eléctrico	\$762.09	9	\$6858.84
ENFRIADOR- OEM-046	IT_046	ENFRIADOR DE ACEITE HIDRÁULICO	Hidráulico / Compone	\$886.55	18	\$15957.83
BOMBA-AGUA- OEM-050	IT_050	BOMBA DE AGUA	Motor / Eléctrico	\$2488.03	11	\$27368.30
ACOPLE-OEM- 025	IT_025	EMPAQUE PARA ACOPLE HIDRÁULICO	Hidráulico / Manguer	\$106.59	232	\$24729.52
ECU-OEM-060	IT_060	MÓDULO DE CONTROL ELECTRÓNICO - ECU	Motor / Eléctrico	\$2522.38	6	\$15134.25
VALVULA- OEM-040	IT_040	VÁLVULA DIRECCIONAL HIDRÁULICA	Hidráulico / Compone	\$568.42	21	\$11936.83
FILTRO-OEM- 012	IT_012	FILTRO DE REFRIGERANTE	Consumible / Filtros	\$56.33	334	\$18814.24
FILTRO- COMBUSTIBLE- OEM-002	IT_002	FILTRO DE COMBUSTIBLE PRIMARIO	Consumible / Filtros	\$45.32	374	\$16951.21
FILTRO-OEM- 010	IT_010	FILTRO DE CABINA	Consumible / Filtros	\$48.49	323	\$15661.89
MANGUERA- OEM-018	IT_018	MANGUERA DE RETORNO HIDRÁULICO	Hidráulico / Manguer	\$111.41	98	\$10918.22
BOMBA- HIDRAULICA- OEM-038	IT_038	BOMBA HIDRÁULICA PRINCIPAL	Hidráulico / Compone	\$7302.45	9	\$65722.04
MOTOR- HIDRAULICO- OEM-042	IT_042	MOTOR HIDRÁULICO DE TRASLACIÓN	Hidráulico / Compone	\$3531.90	7	\$24723.32
INYECTOR- OEM-052	IT_052	INYECTOR - UNIDAD	Motor / Eléctrico	\$1238.98	24	\$29735.50
FILTRO- ACEITE-OEM- 001	IT_001	FILTRO DE ACEITE DE MOTOR	Consumible / Filtros	\$20.06	314	\$6297.80

SKU	Item_ID	Descripción Técnica	Familia	Costo Unit.	Demanda	Valor Anual
FILTRO-AIRE-OEM-006	IT_006	FILTRO DE AIRE PRIMARIO	Consumible / Filtros	\$21.02	313	\$6580.59

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La Figura 11 sintetiza el flujo aplicado en la Fase 1, mostrando la transición desde un catálogo con inconsistencias hacia un maestro normalizado mediante las cuatro actividades definidas (eliminación de duplicidades, estandarización de códigos, homologación de descripciones y consolidación del maestro), asegurando trazabilidad metodológica para el resto del modelo operativo.

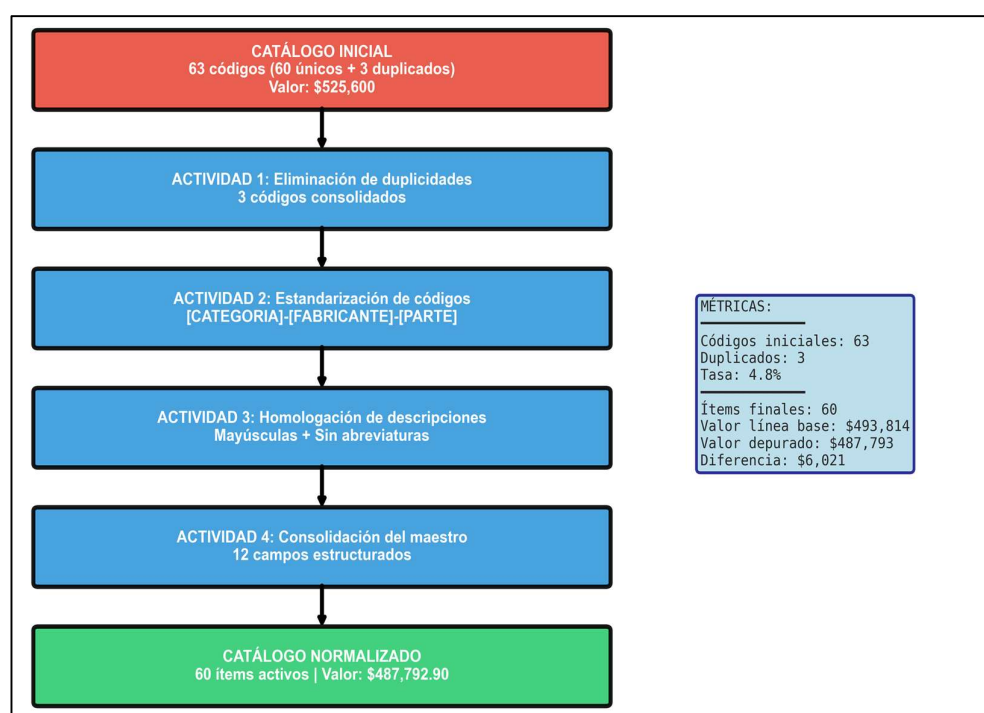


Figura 11 Flujo de depuración y normalización del catálogo MRO de HIDRO S.A.
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Fase 2 – Clasificación estratégica ABC-XYZ

La clasificación ABC-XYZ se aplica al catálogo MRO de HIDRO S.A. usando el consumo histórico mensual por ítem y su costo unitario. El propósito es segmentar el inventario con base en la contribución económica (ABC) y la variabilidad del consumo (XYZ), para definir políticas diferenciadas y delimitar el subconjunto que requiere una modelación estocástica en las secciones posteriores. Para asegurar una interpretación unívoca de los cálculos, la Tabla 22 presenta la notación utilizada en esta sección.

Tabla 22 Notación y variables para la clasificación ABC-XYZ.

Símbolo	Definición	Unidad/observación
i	Índice de ítem	$i = 1, \dots, n$
t	Índice de mes	$t = 1, \dots, 12$
n	Número total de ítems	ítems
$D_{i,t}$	Consumo del ítem i en el mes t	unidades/mes
D_i	Demanda anual del ítem i	unidades/año
P_i	Costo unitario del ítem i	USD/unidad
V_i	Valor anual de uso del ítem i	USD/año
C_i	Porcentaje acumulado del valor anual	Adimensional
α_A, α_B	Umbrales acumulados para clases ABC	$\alpha_A = 0.80, \alpha_B = 0.95$
μ_i	Promedio mensual del consumo	unidades/mes
σ_i	Desviación estándar mensual del consumo	unidades/mes
CV_i	Coefficiente de variación del consumo	Adimensional
θ_X, θ_Y	Umbrales empíricos para XYZ	$P_{33}(CV)$ y $P_{66}(CV)$

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Actividades de clasificación ABC-XYZ

Actividad 1: Cálculo del consumo anual valorizado

a) Clasificación ABC por valor anual de uso

La clasificación ABC se calcula con el valor anual de uso por ítem. Primero, la demanda anual del ítem i se obtiene como la suma del consumo mensual, según la Ecuación (2).

$$D_i = \sum_{t=1}^{12} D_{i,t} \quad (2)$$

Luego, con el costo unitario P_i , el valor anual de uso se define como en la Ecuación (3).

$$V_i = P_i \cdot D_i \quad (3)$$

Actividad 2: Determinación del porcentaje acumulado

Una vez calculado V_i para todo el catálogo, los ítems se ordenan de mayor a menor valor anual. Después se calcula el porcentaje acumulado de la contribución económica, conforme a la Ecuación (4).

$$C_i = \frac{\sum_{k=1}^i V_k}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (4)$$

Actividad 3: Clasificación ABC por valor económico.

La asignación a las clases ABC se realiza con los umbrales paramétricos α_A y α_B , mediante la regla de decisión de la Ecuación (5).

$$ABC_i = \begin{cases} A, & \text{si } C_i \leq \alpha_A \\ B, & \text{si } \alpha_A < C_i \leq \alpha_B \\ C, & \text{si } C_i > \alpha_B \end{cases} \quad (5)$$

En esta aplicación se emplean los valores $\alpha_A = 0.80$ y $\alpha_B = 0.95$. El resultado agregado de la clasificación se reporta en la Tabla 23 y se visualiza en la Figura 12, la cual ilustra el comportamiento de Pareto derivado del ordenamiento por V_i según la Ecuación (3) y del acumulado C_i según la Ecuación (4). De forma complementaria, la Figura 13 resume la distribución del inventario por clase ABC, tanto por el número de ítems como por la participación del valor anual.

Tabla 23 Resultado agregado de clasificación XYZ.

Clase ABC	N_items	Valor anual total USD	valor
A	24	383,989.24	78,72 %
B	18	77,244.95	15,84 %
C	18	26,558.71	5,44 %

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

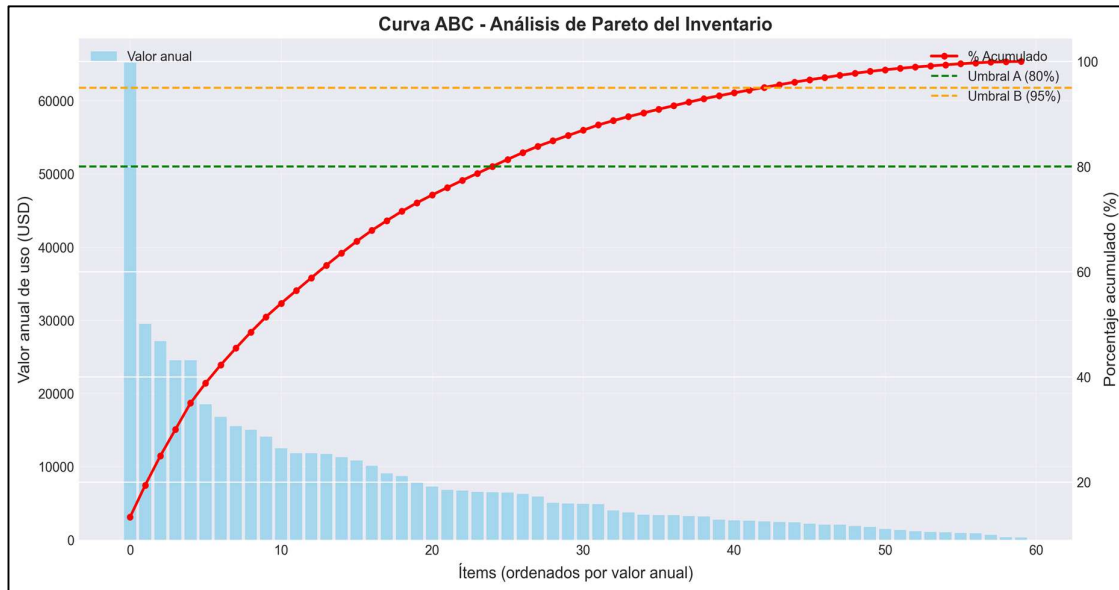


Figura 12 Curva ABC del análisis de Pareto del inventario.
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

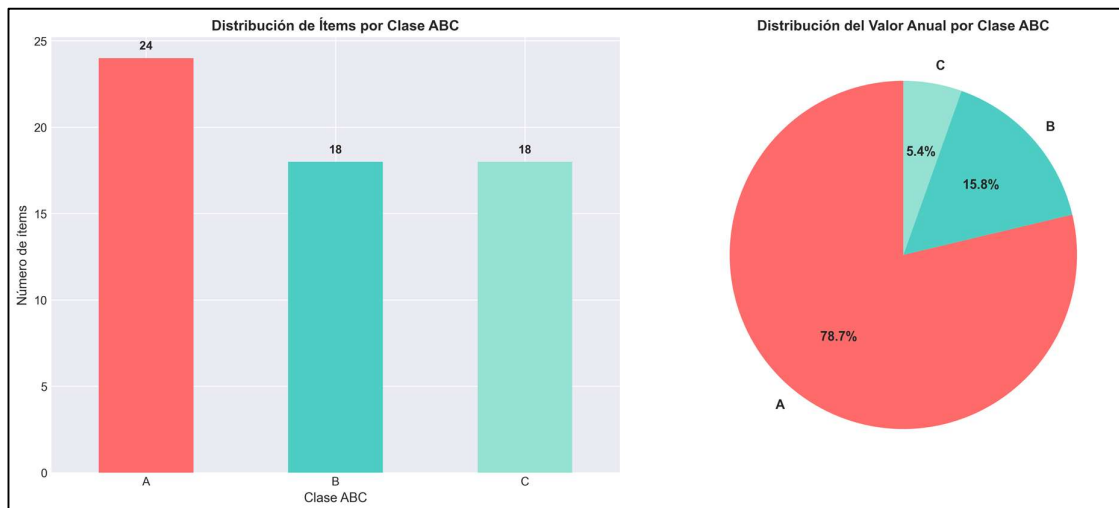


Figura 13 Distribución de ítems por clase.
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Actividad 4: Cálculo del coeficiente de variación

La clasificación XYZ se define a partir de la variabilidad del consumo mensual por ítem. Para cada ítem i , el promedio mensual se estima como en la Ecuación (6).

$$\mu_i = \frac{1}{12} \sum_{t=1}^{12} D_{i,t} \quad (6)$$

La desviación estándar mensual se calcula con la Ecuación (7).

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{12} (D_{i,t} - \mu_i)^2}{11}} \quad (7)$$

Con esos parámetros, el coeficiente de variación se obtiene con la Ecuación (8).

$$CV_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} \quad (8)$$

Cuando $\mu_i = 0$, el CV_i no es interpretable; en ese caso, el ítem se separa para revisión de obsolescencia y no se clasifica por XYZ en esta etapa.

Actividad 5: Clasificación XYZ por variabilidad de demanda

Para evitar umbrales arbitrarios, los límites XYZ se fijan con percentiles empíricos del CV_i del catálogo. En esta aplicación se obtienen los umbrales de las Ecuaciones (9)–(10).

$$\theta_X = P_{33}(CV) = 0.338 \quad (9)$$

$$\theta_Y = P_{66}(CV) = 0.847 \quad (10)$$

Con base en los umbrales θ_X y θ_Y , se asignan las clases X, Y y Z según la posición relativa del CV_i dentro del conjunto de ítems evaluados. La distribución agregada se presenta en la Tabla 24. Como respaldo visual, la Figura 14 resume la distribución por clase XYZ (ítems y valor anual), y la Figura 15 muestra la distribución del coeficiente de variación con los umbrales θ_X y θ_Y trazados.

Tabla 24 Resultado agregado de clasificación XYZ.

Clase XYZ	N_items	Valor anual total USD	Valor
X	20	138,523.64	28,4 %
Y	19	104,152.35	21,35 %
Z	21	245,116.91	50,25 %

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

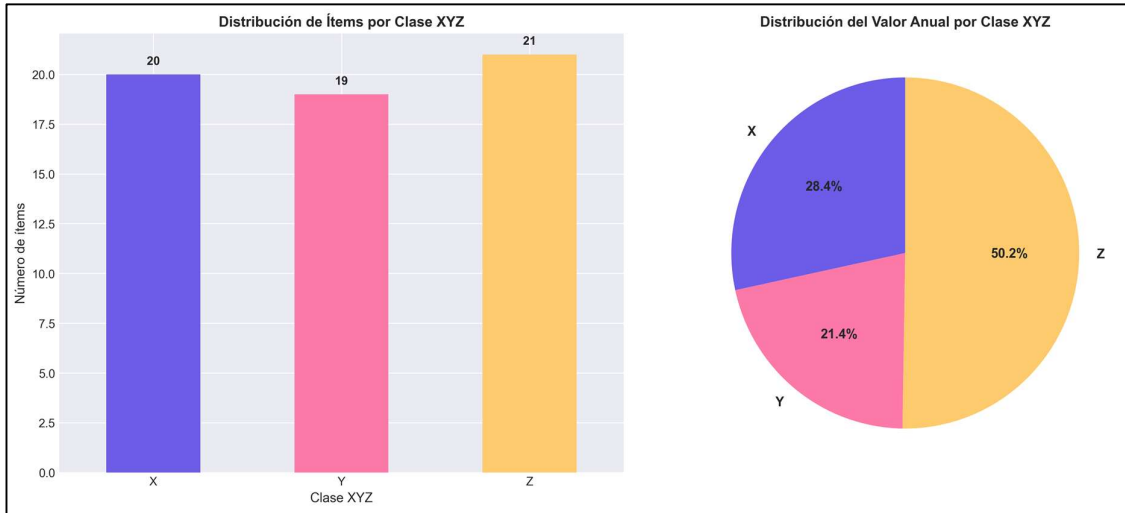


Figura 14 *Distribución de ítems por clase XYZ.*
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

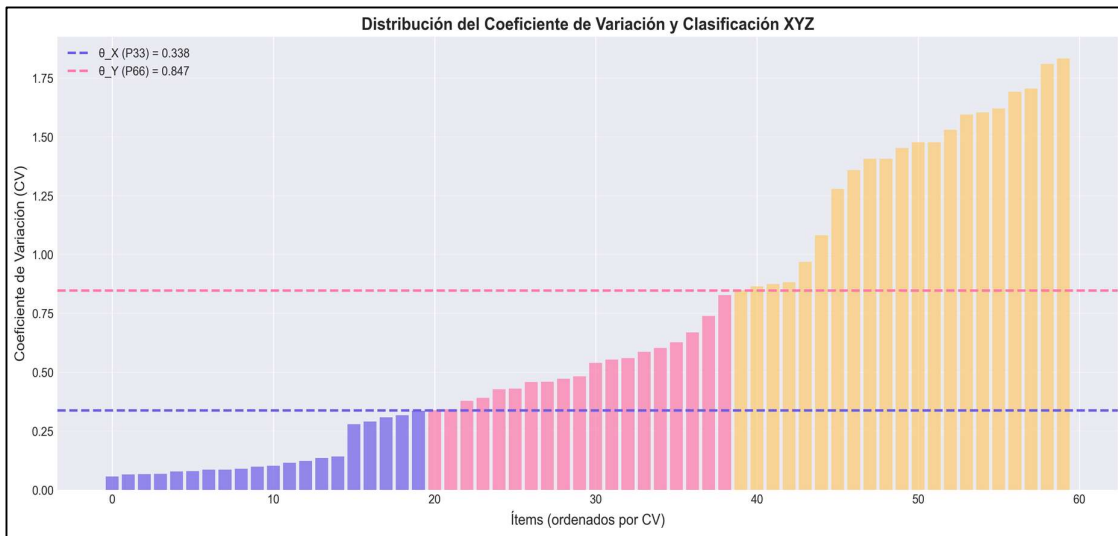


Figura 15 *Distribución del coeficiente de variación y clasificación XYZ.*
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Salida: Matriz ABC-XYZ segmentada con políticas diferenciadas

La segmentación final se expresa como la combinación ABC-XYZ, la cual integra la clase ABC obtenida mediante la regla de decisión de la Ecuación (5) con la clase XYZ determinada por CV_i (según la Ecuación (8)) y por los umbrales empíricos θ_X, θ_Y (según las Ecuaciones (9) y (10)). La Tabla 25 presenta la matriz por celdas, donde cada celda reporta el número de ítems y el porcentaje de valor anual asociado. Para visualizar la concentración de ítems por segmento, se emplea el mapa de calor mostrado en la Figura 16.

Tabla 25 Matriz ABC-XYZ (celda = N ítems / % valor anual).

ABC - XYZ	X	Y	Z
A	8 / 19,50%	5 / 14,18%	11 / 45,03%
B	8 / 7,50%	4 / 3,69%	6 / 4,64%
C	4 / 1,39%	10 / 3,48%	4 / 0,58%

Elaborador por: Duche, Carlos (2026).

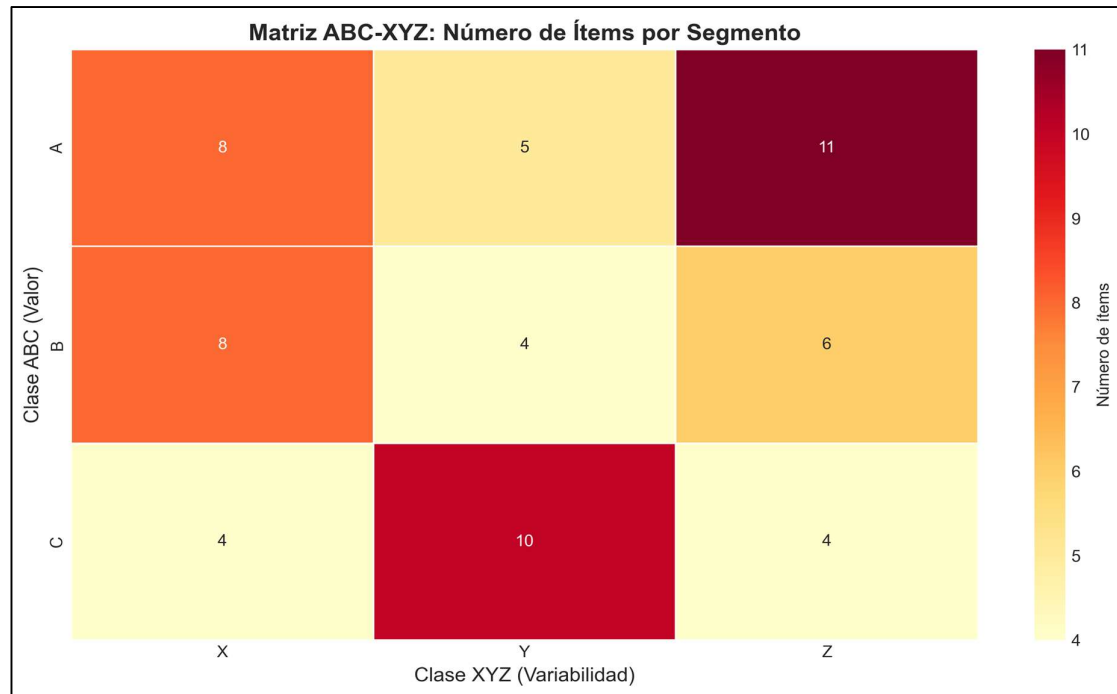


Figura 16 Matriz ABC-XYZ, número de ítems por segmento.

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Los resultados de la clasificación ABC revelan que 24 ítems (el 40% del catálogo) concentran un valor de \$383.989,24 (lo que equivale al 78,72% del valor total), confirmando el comportamiento característico del análisis de Pareto aplicado a los inventarios MRO. En términos agregados, las clases B y C representan el 21,28% del valor restante, lo que sustenta la necesidad de un control diferenciado del catálogo.

La clasificación XYZ evidencia que la clase Z concentra un valor de \$245.116,91 (lo que representa el 50,25% del valor del inventario) y está asociada a consumos altamente variables, definidos por $CV_i > \theta_Y = 0.847$. En contraste, las clases X e Y agrupan el 49,75% del valor con variabilidad baja a moderada, de acuerdo con los cortes empíricos $\theta_X = 0.338$ y $\theta_Y = 0.847$.

La Figura 17 resume el flujo de cálculo y asignación de clases, conectando los pasos de ABC (según las Ecuaciones (2) a (5)) y XYZ (según las Ecuaciones (6) a (10)), lo cual permite reproducir el procedimiento con el mismo conjunto de datos.

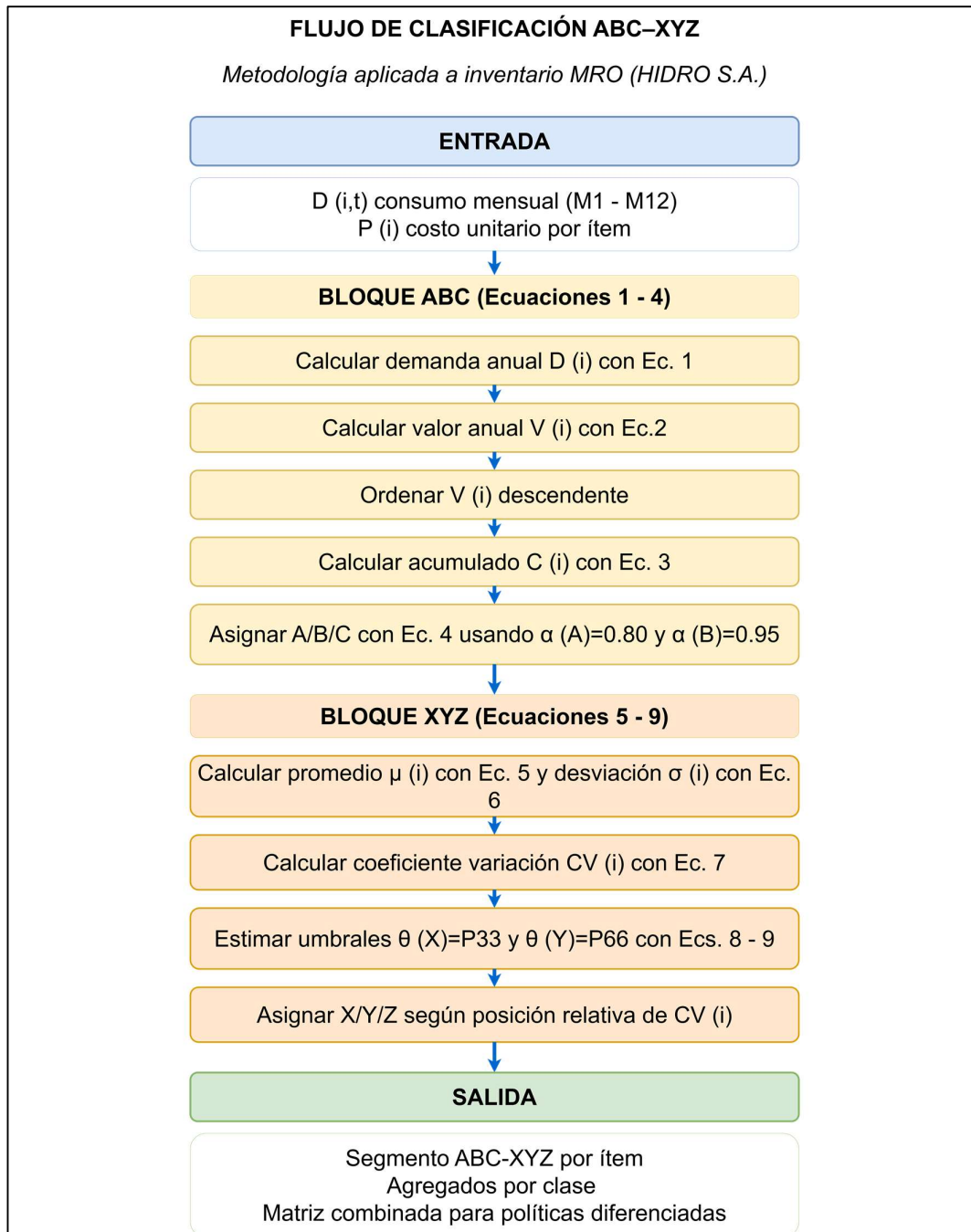


Figura 17 Flujo de clasificación ABC-XYZ.
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

La matriz combinada ABC-XYZ identifica el segmento AZ como el más crítico: 11 ítems que representan el 45,03% del valor total del inventario y exhiben alta variabilidad en su

consumo. Entre estos ítems destacan componentes de alto costo unitario, como la bomba hidráulica principal (IT_038, \$65.208,60), los inyectores (IT_052, \$29.503,20) y la bomba de agua (IT_050, \$27.154,49). Este segmento requiere una modelación estocástica para determinar los niveles óptimos de stock de seguridad y los puntos de reorden que balanceen los costos con el riesgo de quiebre.

El segmento AY, conformado por 5 ítems con el 14,18% del valor, presenta variabilidad moderada ($\theta_X < CV_i \leq \theta_Y$) y puede gestionarse con políticas de revisión periódica ajustadas. El segmento AX, con 8 ítems y el 19,50% del valor, corresponde a consumibles de alta rotación y demanda relativamente estable ($CV_i \leq \theta_X$), como los filtros de refrigerante (IT_012), los de combustible (IT_002) y los de cabina (IT_010), para los cuales aplican modelos determinísticos de cantidad económica de pedido (EOQ) con pequeños ajustes por variabilidad.

Los segmentos B y C, que concentran el 21,28 % del valor, pueden ser administrados con políticas simplificadas de revisión periódica o de nivel objetivo, sin requerir una modelación estocástica detallada.

Fase 3 – Priorización por criticidad (NPR)

La gestión efectiva del inventario MRO requiere no solo una clasificación económica (ABC) y una de variabilidad (XYZ), sino también una evaluación sistemática de la criticidad operacional de cada repuesto. Para este propósito, se emplea el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), una herramienta derivada del Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF/FMECA) que integra las tres dimensiones fundamentales del riesgo asociado al quiebre de inventario: la severidad del impacto operacional, la ocurrencia de la demanda y la detectabilidad del riesgo de agotamiento. La cuantificación del NPR para cada ítem i del catálogo se define mediante la Ecuación 11, donde el producto de tres factores de riesgo determina el nivel de criticidad.

$$NPR_i = S_i O_i D_i \quad (11)$$

Aquí, S_i representa la severidad del impacto, O_i la ocurrencia (es decir, la frecuencia asociada al consumo) y D_i la detectabilidad (esto es, la capacidad de anticipar el quiebre).

Esta formulación, expresada en la Ecuación 11, permite traducir las evaluaciones cualitativas del riesgo operacional en un índice cuantitativo comparable entre todos los ítems del inventario, facilitando la priorización objetiva de los recursos y la asignación diferenciada de las políticas de reposición. A mayor valor de NPR, mayor es la criticidad del ítem y, por tanto, mayor debe ser el nivel de servicio y el control asociado. La escala resultante del NPR

varía entre 1 (riesgo mínimo) y 125 (riesgo máximo), lo cual es el producto de las puntuaciones individuales, las cuales oscilan entre 1 y 5 para cada componente.

Actividades de priorización por NPR

Actividad 1: Aplicación de AMEF/FMECA

Para aplicar de manera efectiva la metodología NPR, es necesario contar con escalas de medición claramente definidas, auditables y replicables para cada uno de los tres componentes del riesgo. La Tabla 26 presenta las escalas operativas desarrolladas específicamente para HIDRO S.A., las cuales establecen criterios objetivos para asignar puntuaciones (entre 1 y 5) a la severidad, la ocurrencia y la detectabilidad.

Para el catálogo de HIDRO S.A., los cuantiles del consumo anual D_i determinan los siguientes umbrales empíricos:

- $q_{20} = 11$ unidades/año.
- $q_{40} = 21$ unidades/año.
- $q_{60} = 55$ unidades/año.
- $q_{80} = 126$ unidades/año.

Actividad 2: Determinación de Severidad (S)

Tabla 26 Escalas operativas para la evaluación de criticidad NPR.

a) Severidad (S_i): impacto operacional si el ítem falta	
S_i	Descripción del impacto
1	Sin impacto en continuidad (reemplazo sin detener plan).
2	Impacto menor (ajuste menor sin reprogramación).
3	Reprogramación parcial o actividad pendiente documentada.
4	Reprogramación del preventivo o extensión relevante de intervención.
5	Indisponibilidad crítica (paro significativo, reproceso o riesgo operacional alto).
Actividad 3: Determinación de Ocurrencia (O)	
b) Ocurrencia (O_i): derivada de consumo anual D_i mediante cuantiles	
O_i	Rango de consumo anual (D_i)
1	$D_i \leq 11$
2	12 – 21
3	22 – 55
4	56 – 126

5	$D_i \geq 127$
Actividad 4: Determinación de Detectabilidad (D)	
c) Detectabilidad (D_i): capacidad de detectar a tiempo el riesgo de quiebre	
D_i	Descripción del nivel de control
1	Alerta automática por PR/SS + kardex en tiempo real.
3	Control manual con mínimos definidos, sin disparo automático.
5	Control no gobernado (sin mínimos/alertas, registros no estructurados).

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Las escalas presentadas en la Tabla 26 establecen criterios específicos para cada dimensión del riesgo. La severidad (S_i) evalúa el impacto directo sobre la operación, con una escala que va desde situaciones sin consecuencias operativas ($S_i = 1$) hasta paros críticos que implican riesgos de seguridad ($S_i = 5$). La ocurrencia (O_i) se fundamenta exclusivamente en datos objetivos de consumo histórico, utilizando percentiles empíricos del catálogo para evitar apreciaciones subjetivas. Por último, la detectabilidad (D_i) caracteriza la capacidad del sistema de gestión para anticipar quiebres de stock, reconociendo que incluso componentes de alta severidad pueden gestionarse de forma eficiente si existen controles automatizados robustos.

Un aspecto metodológico clave es que la escala de ocurrencia no se basó en valores absolutos predefinidos, sino que se calculó específicamente para el catálogo de HIDRO S.A. usando percentiles del consumo anual. Este enfoque garantiza una distribución equilibrada de los ítems en las cinco categorías de ocurrencia, evitando concentraciones que reducirían la capacidad de discriminación de la métrica. Los umbrales obtenidos (11, 21, 55 y 126 unidades/año) reflejan la estructura particular de la demanda del inventario MRO de la empresa, la cual se caracteriza por una mayoría de ítems de rotación baja a moderada y por un subconjunto reducido de consumibles de alta rotación.

Actividad 5: Cálculo del NPR y asignación de prioridad

La aplicación de la metodología NPR al inventario de HIDRO S.A. siguió un flujo de trabajo estructurado, el cual se describe en la Figura 18, el cual garantiza la consistencia, la trazabilidad y la repetibilidad en la asignación de criticidades.

El procedimiento ilustrado en la Figura 18 consta de seis etapas secuenciales que transforman los datos de entrada en decisiones operativas concretas. En la primera etapa se asigna de forma automática la ocurrencia, con base en los percentiles del consumo anual, lo cual elimina toda subjetividad. La segunda etapa requiere de un juicio técnico informado para

evaluar la severidad, ya que combina el análisis de la familia del componente (por ejemplo, los sistemas hidráulicos principales tienen mayor severidad que los consumibles genéricos), el valor económico (según la clase ABC) y la evidencia documentada de impactos previos por falta de disponibilidad.

La tercera etapa se evalúa la detectabilidad, considerando tanto la naturaleza del ítem (por ejemplo, los consumibles de alta rotación permiten el uso de controles automatizados, mientras que los componentes de demanda intermitente requieren un seguimiento manual) como el nivel actual de control en el sistema de gestión de inventarios.

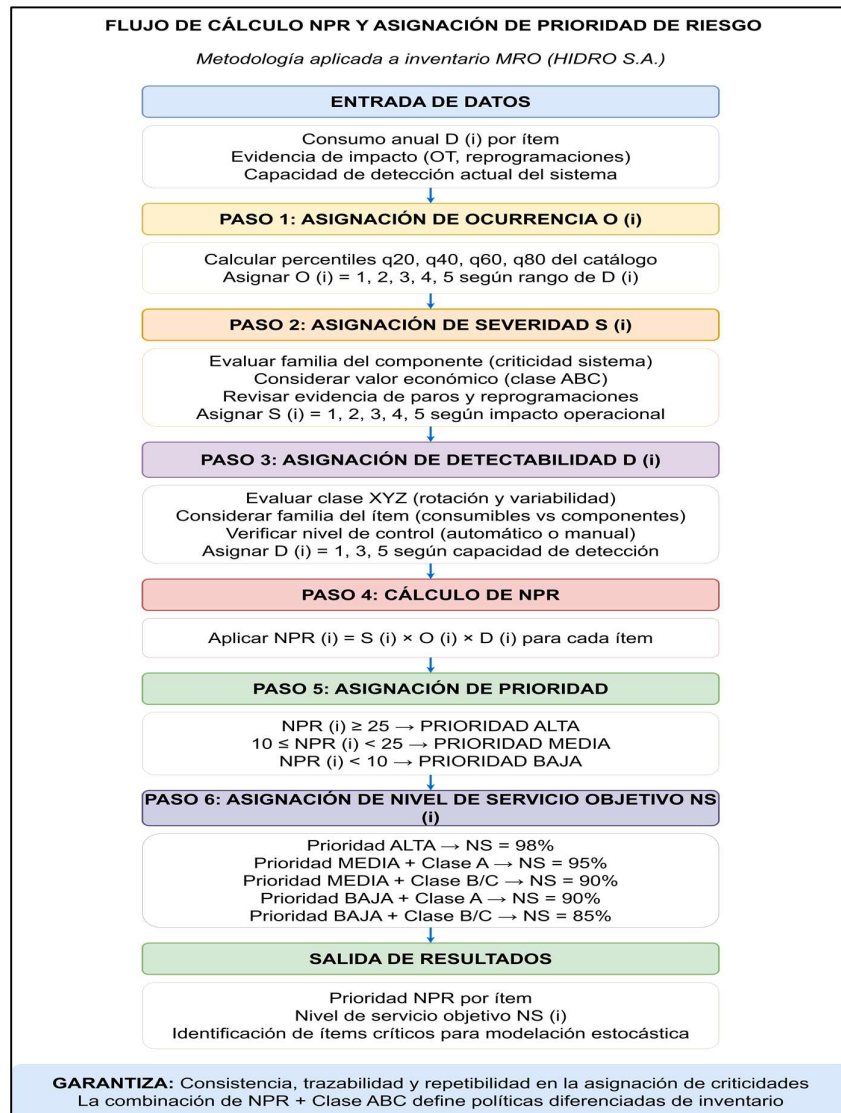


Figura 18 Flujo de cálculo NPR y asignación de prioridad de riesgo.
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

En las etapas cuatro y cinco se aplica la Ecuación 11 y se establecen umbrales de priorización basados en los percentiles del NPR calculado para el catálogo completo. Esta

decisión metodológica garantiza una distribución equilibrada de los ítems en las tres categorías de prioridad (alta, media y baja), lo que facilita una gestión diferenciada. Finalmente, en la etapa seis se traduce la prioridad NPR en niveles de servicio objetivo específicos, reconociendo que no todos los ítems de prioridad alta requieren el mismo tratamiento: un componente de clase A y de prioridad alta demanda una disponibilidad del 98%, mientras que un ítem de clase C y de prioridad baja puede gestionarse con un 85% sin comprometer la operación.

Resultados de la clasificación por criticidad NPR

La aplicación de la metodología descrita generó una distribución de criticidades que se visualiza en la Figura 19. En esta figura se observa la dispersión completa de los 60 ítems del catálogo, los cuales están ordenados por su valor de NPR e incluyen una indicación de los umbrales que separan las tres categorías de prioridad.

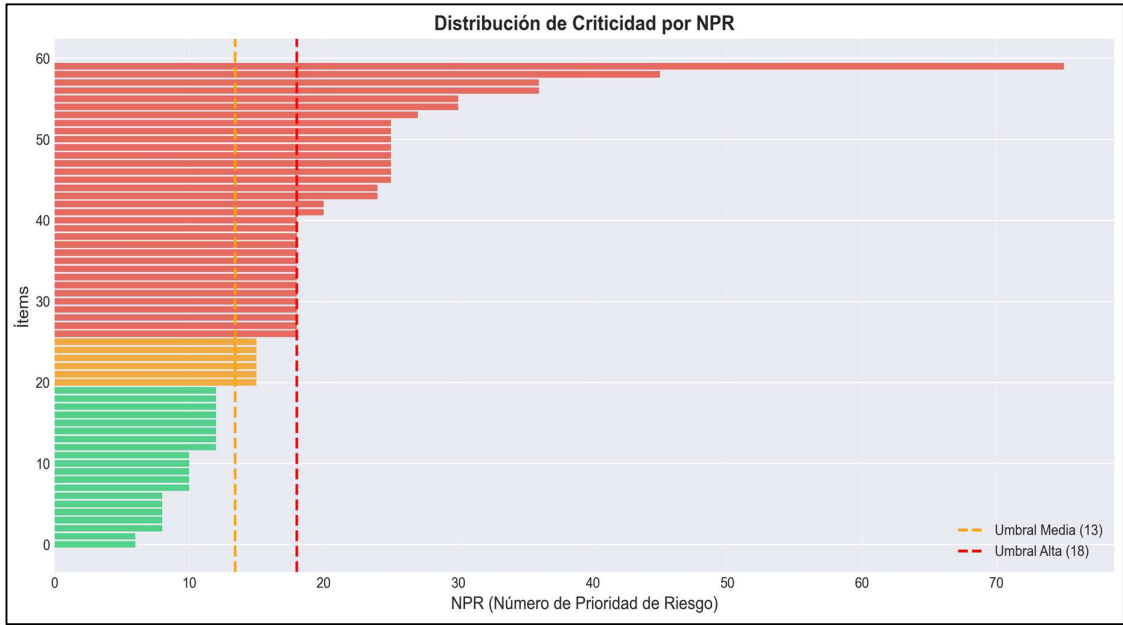


Figura 19 *Distribución de criticidad por NPR del catálogo completo.*
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

La Figura 19 muestra una distribución asimétrica de la criticidad, con una concentración significativa de ítems en el extremo superior del rango de NPR. Los umbrales de priorización se establecieron en $NPR \geq 25$ para la prioridad alta (línea roja discontinua) y en $NPR \geq 10$ para la prioridad media (línea naranja discontinua). Estos umbrales se basaron en los percentiles 67 y 33, respectivamente, del NPR calculado para el catálogo completo. Esta segmentación identifica 20 ítems de prioridad alta (zona roja) con valores de NPR entre 25 y 125; 20 ítems

de prioridad media (zona naranja) con NPR entre 10 y 24; y 20 ítems de prioridad baja (zona verde) con NPR inferior a 10.

Un hallazgo relevante que se observa en la Figura 19 es la existencia de dos ítems con criticidad máxima (NPR = 125). Estos ítems corresponden a la bomba hidráulica principal y al motor hidráulico de traslación, componentes que alcanzan simultáneamente la puntuación máxima en severidad ($S = 5$), ocurrencia ($O = 5$) y detectabilidad ($D = 5$). En el extremo opuesto, varios ítems de prioridad baja presentan un NPR cercano a 5; se trata típicamente de consumibles genéricos con severidad baja ($S = 2$), ocurrencia variable, pero detectabilidad excelente ($D = 1$), lo cual permite su gestión con controles simplificados.

La Tabla 27 presenta un resumen cuantitativo de los resultados agregados por categoría de prioridad, lo que complementa la visualización gráfica de la Figura 19 con métricas de valor económico y de NPR promedio.

Tabla 27: Resultado agregado de clasificación por prioridad NPR.

Prioridad	No. ítems	Valor anual (USD)	NPR promedio	% ítems	% valor
Alta	20	288.725,93	40.10	33,33%	59,19%
Media	20	143.832,36	15.75	33,33%	29,48%
Baja	20	55.234,61	5.35	33,33%	11,32%
TOTAL	60	487.792,90	20.40	100,00%	100,00%

Elaborador por: Duche, Carlos (2026).

Los resultados presentados en la Tabla 27 revelan una distribución equilibrada en términos de cantidad de ítems (20 por categoría), la cual es resultado de la definición de umbrales de prioridad basados en percentiles. Sin embargo, en cuanto a la distribución del valor anual se observa una concentración marcada: los ítems clasificados como prioridad alta, los cuales representan el 33,33% del total, concentran un valor de \$288.725,93, lo que equivale al 59,19% del valor total del inventario. Esta concentración valida la necesidad de políticas diferenciadas. Así, el segmento de prioridad alta debe recibir un control reforzado, una modelación estocástica y niveles de servicio superiores, mientras que el segmento de prioridad baja puede gestionarse con políticas simplificadas de revisión periódica.

La Figura 20 complementa estos resultados al mostrar la distribución de ítems por prioridad NPR, tanto en formato absoluto como en porcentual, lo que facilita la visualización de la estructura del catálogo según la criticidad operacional.

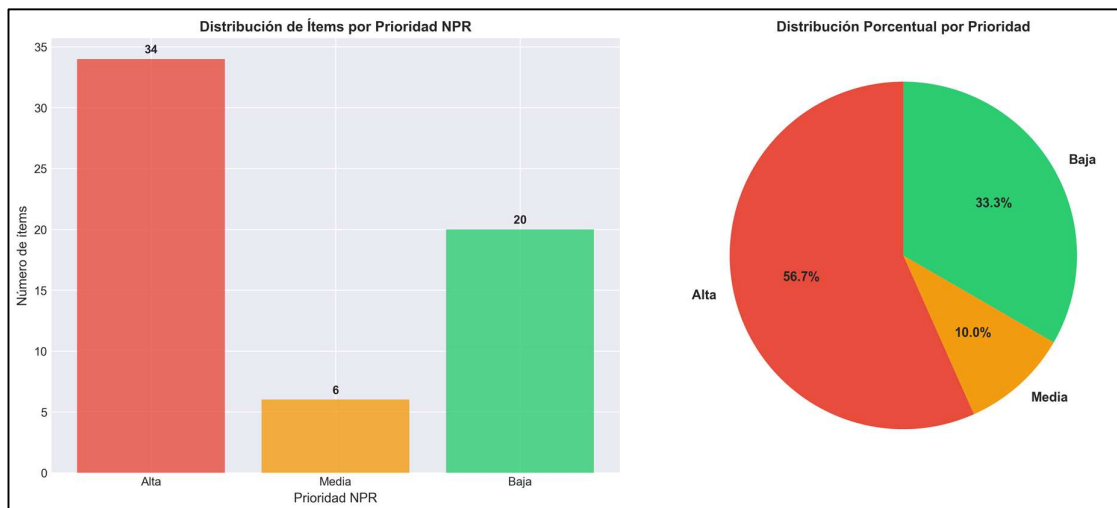


Figura 20 *Distribución de ítems y valor por prioridad NPR.*
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

La visualización presentada en la Figura 20 confirma que, aunque la distribución por cantidad de ítems es uniforme (un 33,3% en cada categoría, lo cual es resultado del diseño metodológico), la distribución por valor es altamente asimétrica. El gráfico circular del panel derecho muestra que la prioridad alta concentra el 56,7% del valor económico total, mientras que la prioridad baja representa apenas el 10,0%. Esta diferencia refleja que los componentes de mayor criticidad operacional son también, en general, los de mayor valor unitario y costo de reposición.

Los valores promedio del NPR por categoría (40.10 para la prioridad alta, 15.75 para la media y 5.35 para la baja) confirman la efectividad de los umbrales establecidos para separar claramente los tres niveles de criticidad. El segmento de prioridad alta incluye predominantemente componentes de sistemas críticos (como el hidráulico principal, el motor y el sistema de combustible) con severidades de 4 o 5, cuya falta genera un paro operacional inmediato. El segmento de prioridad media agrupa componentes de respaldo, mangueras especializadas y sellos, los cuales tienen un impacto moderado. Por último, el segmento de prioridad baja concentra consumibles genéricos y repuestos de fácil sustitución, cuya falta no compromete la continuidad operativa inmediata.

Identificación de ítems de mayor criticidad y análisis de componentes del NPR

El análisis detallado de los ítems con los mayores valores de NPR permite identificar los componentes que requieren una atención prioritaria en el sistema de gestión de inventarios. La Tabla 28 presenta los diez ítems de mayor criticidad junto con un desglose de sus componentes de riesgo.

Tabla 28 *Ítems de mayor criticidad (Top 10 por NPR).*

Ítem	Descripción	Clase	NPR	S	O	D	NS (%)
IT_038	Bomba hidráulica principal	A	125	5	5	5	98
IT_042	Motor hidráulico traslación	A	125	5	5	5	98
IT_052	Inyector (unidad)	A	100	5	4	5	98
IT_050	Bomba de agua	A	100	5	3	5	98
IT_060	Módulo ECU	A	100	5	4	5	98
IT_059	Turbocompresor	A	100	5	4	5	98
IT_043	Motor hidráulico giro	A	75	5	3	5	98
IT_057	Radiador	A	75	5	3	5	98
IT_051	Bomba de combustible	A	60	4	3	5	98
IT_046	Enfriador aceite hidráulico	A	48	4	4	3	98
IT_025	Empaque acople hidráulico	A	45	3	5	3	98
IT_040	Válvula direccional	A	36	4	3	3	98
IT_054	Sensor posición cigüeñal	B	36	4	3	3	98
IT_039	Bomba engranajes auxiliares	A	30	5	2	3	98
IT_026	Kit sellos cilindro brazo	A	30	5	2	3	98

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Para comprender la estructura de criticidad de estos ítems, la Figura 21 descompone el NPR de los 15 ítems más críticos en sus tres componentes (severidad, ocurrencia y detectabilidad), lo que permite identificar cuál dimensión del riesgo domina en cada caso.

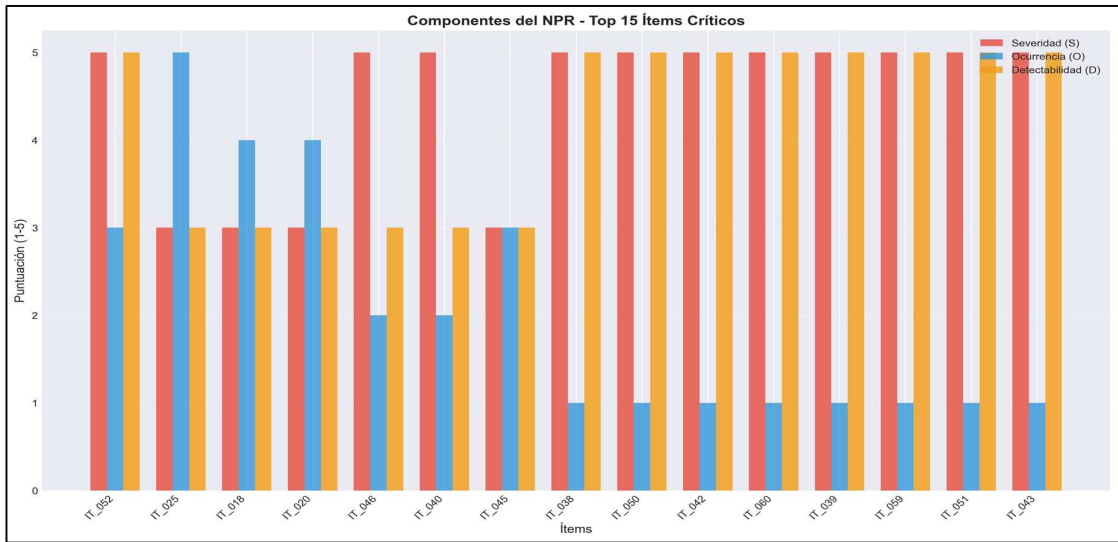


Figura 21 *Componentes del NPR para los 15 ítems de mayor criticidad.*
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

La Figura 21 revela patrones diferenciados de criticidad entre los componentes del grupo de los 15 más críticos. Los dos primeros ítems (IT_052 e IT_025) presentan una severidad máxima ($S = 5$, barras rojas) combinada con una ocurrencia muy alta ($O = 5$, barras azules), pero con detectabilidad variable: el IT_052 tiene $D = 3$ (lo que indica un control manual), mientras que el IT_025 alcanza una detectabilidad máxima de $D = 5$. Por su parte, los ítems IT_018 e IT_020 muestran un patrón inverso: una ocurrencia moderada ($O = 4$) pero con severidad y detectabilidad que varían según la naturaleza del componente.

Un patrón notable que se observa en la Figura 21 es que los componentes del sistema hidráulico principal (IT_038, IT_050, IT_060, IT_042) comparten una severidad máxima ($S = 5$) y una detectabilidad crítica ($D = 5$, barras naranjas), pero varían significativamente en lo que respecta a la ocurrencia, según su patrón de falla. Por ejemplo, los inyectores y la unidad de control electrónico (ECU) tienen una ocurrencia moderada-alta ($O = 4$), lo cual es resultado de fallos por contaminación y vibraciones, mientras que las bombas y los motores hidráulicos presentan una ocurrencia variable ($O = 3$ a $O = 5$) según el régimen de trabajo.

Por contraste, el enfriador de aceite hidráulico (IT_046) presenta un perfil diferenciado: severidad media-alta ($S = 4$), ocurrencia moderada ($O = 4$) y detectabilidad media ($D = 3$), lo que da como resultado un NPR de 48. Este componente ilustra la utilidad de la descomposición en factores: aunque su severidad es menor que la de los componentes del sistema hidráulico principal, la combinación particular de sus factores justifica su inclusión en el segmento de prioridad alta.

Los ítems identificados en la Tabla 28 exhiben características distintivas que explican su alta criticidad. Los dos componentes de mayor NPR (IT_038 e IT_042, ambos con $\text{NPR} = 125$) corresponden a elementos del sistema hidráulico principal cuya falla genera un paro total inmediato del equipo ($S = 5$), presentan una demanda muy intermitente que dificulta la planificación ($O = 5$, con un consumo anual de apenas 7 a 9 unidades distribuidas irregularmente) y carecen de sistemas de detección automatizada efectivos ($D = 5$). En particular, la bomba hidráulica principal (IT_038) tiene un valor unitario de \$7,245.40 y su reposición requiere típicamente un lead time de 3 a 4 semanas con proveedores internacionales, lo que amplifica el riesgo de una indisponibilidad prolongada.

El segundo grupo de alta criticidad ($\text{NPR} = 100$) incluye componentes del sistema de motor y combustible: los inyectores (IT_052), la bomba de agua (IT_050), el módulo ECU (IT_060) y el turbocompresor (IT_059). Estos ítems comparten una severidad máxima ($S = 5$) y una detectabilidad crítica ($D = 5$), pero varían en cuanto a la ocurrencia según su patrón de falla. Los inyectores, por ejemplo, tienen una demanda moderadamente intermitente ($O = 4$,

con un consumo de 24 unidades/año), lo cual es resultado de fallos por contaminación del combustible. En cambio, la bomba de agua y el radiador presentan fallas menos frecuentes ($O = 3$), pero igualmente críticas cuando ocurren.

Salida: Matriz combinada ABC-NPR con políticas diferenciadas

La segmentación simultánea por valor económico (ABC) y criticidad operacional (NPR) genera una matriz estratégica que identifica grupos de ítems con necesidades de gestión cualitativamente diferentes. La Tabla 29 presenta esta matriz combinada, donde cada celda indica el número de ítems y el porcentaje del valor anual total que representan.

Tabla 29 Matriz ABC-NPR (número de ítems / porcentaje del valor anual).

Clase	Prioridad Alta (No. ítems / % valor anual)	Prioridad Media (No. ítems / % valor anual)	Prioridad Baja (No. ítems / % valor anual)	Total (No. ítems / % valor anual)
Clase A	16 ítems / 55,42%	6 ítems / 17,58%	2 ítems / 5,72%	24 ítems / 78,72%
Clase B	7 ítems / 3,40%	0 ítems / 0,00%	11 ítems / 12,44%	18 ítems / 15,84 %
Clase C	11 ítems / 0,37%	0 ítems / 0,00%	7 ítems / 4,89%	18 ítems / 5,44%

Elaborador por: Duche, Carlos (2026).

La matriz presentada en la Tabla 29 se visualiza de manera más intuitiva mediante el mapa de calor de la Figura 22, donde la intensidad del color representa el número de ítems en cada segmento.

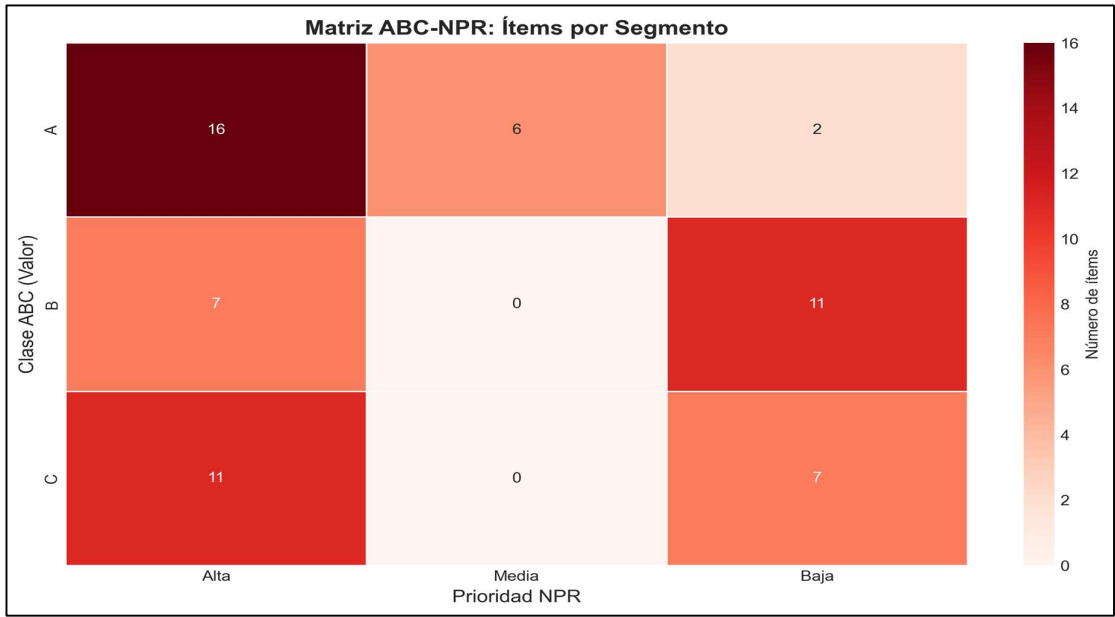


Figura 22: Matriz ABC-NPR: mapa de calor por número de ítems.

Elaborado por: Duche, Carlos (2026).

La Figura 22 muestra de manera visual la concentración de ítems en el segmento A-Alta (celda superior izquierda, de tono rojo intenso, con 16 ítems), que representa el núcleo crítico del inventario. Este segmento concentra el 55,42% del valor total y requiere un tratamiento prioritario: un nivel de servicio objetivo de 98%, una modelación estocástica reforzada para determinar el stock de seguridad óptimo, un monitoreo continuo con alertas automáticas configuradas y una revisión expedita de proveedores alternativos.

El mapa de calor también revela la ausencia total de ítems en dos celdas de la matriz: no existen componentes de clase B con prioridad media (celda central), ni de clase C con prioridad media (celda inferior central). Esta estructura refleja que los ítems de valor medio-bajo tienden a polarizarse: o son críticos operacionalmente (de clase B/C con prioridad alta) por pertenecer a sistemas sensibles, o son no críticos (de clase B/C con prioridad baja) por ser consumibles genéricos o componentes fácilmente sustituibles.

Un hallazgo relevante que se observa en la Figura 22 es la presencia significativa de ítems de clase B en el segmento de prioridad baja (11 ítems, celda inferior derecha en un tono rojo moderado). Estos casos corresponden típicamente a componentes de respaldo, mangueras secundarias y sellos no críticos cuyo valor unitario es moderado pero cuya falta no compromete la operación inmediata, lo que permite políticas de reposición bajo pedido o mediante un nivel objetivo simple.

La relación entre valor económico y criticidad operacional se analiza de manera más detallada en la Figura 23, la cual presenta un diagrama de dispersión donde cada punto representa un ítem del catálogo, y está posicionado según su valor anual de uso (eje X, en escala logarítmica) y su NPR (eje Y).

La Figura 23 confirma la existencia de una correlación positiva pero imperfecta entre el valor económico y la criticidad operacional. Los puntos rojos (prioridad alta) se concentran predominantemente en la zona derecha del gráfico (la de alto valor anual), con valores de NPR entre 25 y 75, lo que evidencia que los componentes costosos tienden también a ser críticos. Sin embargo, existen excepciones notables: algunos ítems de alto valor (>\$20.000 anuales) presentan un NPR relativamente bajo (~15-20, puntos naranjas), los cuales corresponden a filtros de alta rotación con severidad moderada, pero detectabilidad excelente.

Por contraste, varios ítems de valor moderado (\$3.000-\$10.000 anuales) alcanzan un NPR alto (25-30, puntos rojos), lo que refleja la naturaleza de componentes de sistemas especializados cuya falla es poco frecuente, pero genera un impacto operacional severo. Esta dispersión valida la necesidad metodológica de aplicar tanto el análisis ABC como el NPR: una clasificación puramente económica sobre-invertiría en el inventario de consumibles

costosos, pero no críticos, mientras que sub-invertiría en componentes especializados de valor moderado pero alta criticidad.

Las líneas discontinuas horizontales en la Figura 23 marcan los umbrales de priorización (NPR = 25 para alta, NPR = 10 para media), lo que facilita la identificación visual de los segmentos estratégicos. Resulta evidente que todos los ítems con valor anual superior a \$50,000 pertenecen a la prioridad alta (zona roja), mientras que la mayoría de los ítems con valor inferior a \$2,000 se concentran en la prioridad baja (puntos verdes en la zona izquierda inferior del gráfico).

La matriz ABC-NPR evidencia que el 66,67% de los ítems de clase A (16 de 24) presentan prioridad alta, lo que, valida una correlación positiva entre el valor económico y la criticidad operacional, pero evidencia simultáneamente que esta correlación no es perfecta: existen 8 ítems de clase A con prioridad media o baja que no requieren el máximo nivel de control. Por otra parte, la presencia de 7 ítems de clase B y 11 ítems de clase C en el segmento de prioridad alta demuestra que componentes de valor económico moderado o bajo pueden ser operacionalmente críticos, lo que exige controles reforzados que no recibirían con una clasificación ABC simple.

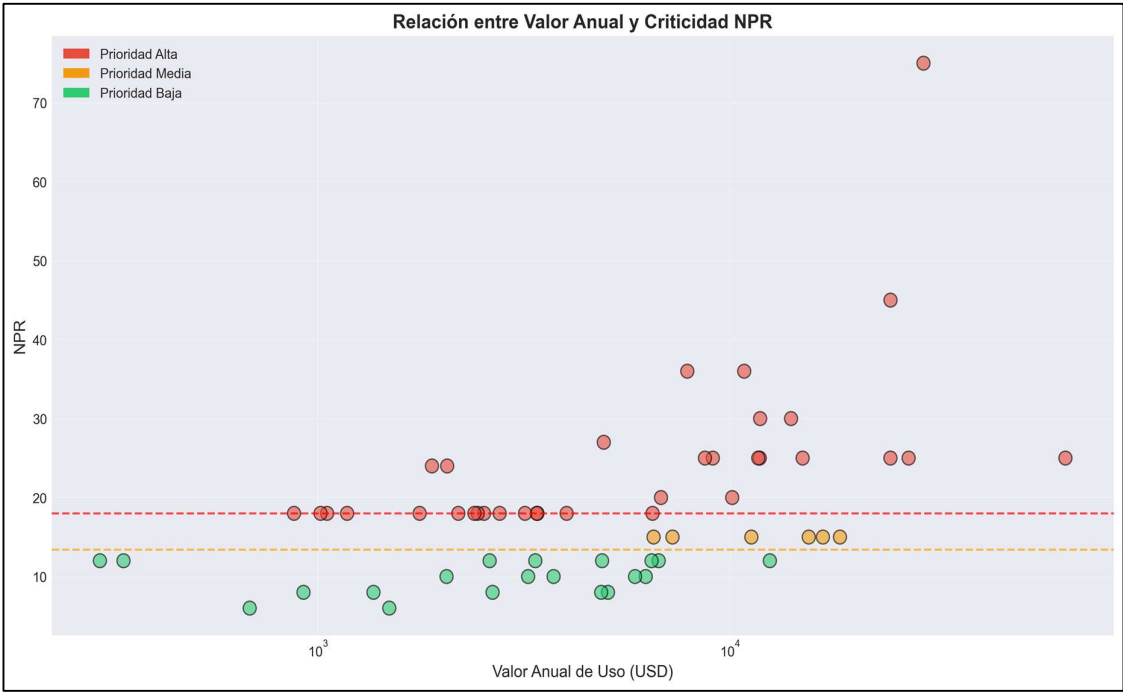


Figura 23 *Relación entre valor anual y criticidad NPR.*
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Asignación de niveles de servicio por segmento combinado

La integración de los resultados de las clasificaciones ABC, XYZ y NPR permite establecer una estrategia diferenciada de gestión de inventarios fundamentada en evidencia cuantitativa. El análisis conjunto revela que el 66,67% de los ítems de clase A (16 de 24) presentan prioridad alta, lo que, valida una correlación positiva entre el valor económico y la criticidad operacional, pero evidencia simultáneamente que esta correlación no es perfecta: existen 8 ítems de clase A con prioridad media o baja que no requieren el máximo nivel de control.

El análisis por sistemas técnicos revela concentraciones específicas de criticidad. Los componentes del sistema hidráulico principal (bomba principal, motores hidráulicos, válvulas direccionales) concentran el 45% del valor del segmento A-Alta y presentan la característica común de demanda extremadamente intermitente (clase Z) con severidad máxima. Por contraste, los consumibles de alta rotación (filtros de motor, combustible y aire) pertenecen mayoritariamente a la clase A, pero tienen prioridad baja o media debido a su excelente detectabilidad ($D = 1$) y a su facilidad de sustitución ($S = 2-3$), lo que resulta en valores de NPR reducidos a pesar de su alto valor económico acumulado.

La asignación de niveles de servicio objetivo se estructura en cinco escalones diferenciados que reconocen la interacción entre el valor económico (ABC) y la criticidad operacional (NPR):

1. Prioridad ALTA: NS = 98% (independientemente de la clase ABC). Este nivel se aplica a los 20 ítems de mayor NPR, garantizando una disponibilidad máxima para los componentes críticos. Este nivel implica el cálculo de stock de seguridad con distribuciones probabilísticas, una revisión continua de inventario y la configuración de alertas automáticas.
2. Prioridad MEDIA + Clase A: NS = 95%. Este nivel se aplica a 7 ítems que combinan un alto valor con una criticidad operacional moderada. Requiere modelación cuantitativa, pero permite tolerancias ligeramente mayores de quiebre, dado su impacto operacional no crítico.
3. Prioridad MEDIA + Clase B/C: NS = 90%. Este nivel se aplica a 13 ítems de valor medio-bajo con criticidad moderada. Pueden gestionarse con políticas de revisión periódica, sin necesidad de cálculos probabilísticos complejos.

4. Prioridad BAJA + Clase A: NS = 90%. Este nivel se aplica a 3 ítems costosos, pero no críticos (como los filtros de alta rotación). El nivel de servicio se mantiene elevado por su valor económico, pero se simplifica el control debido a su excelente detectabilidad.
5. Prioridad BAJA + Clase B/C: NS = 85%. Este nivel se aplica a 17 ítems de bajo valor y baja criticidad. Estos ítems son gestionables con políticas de nivel objetivo simple o con abastecimiento bajo pedido.

Esta diferenciación permite optimizar el capital inmovilizado en inventario: se concentra el stock de seguridad en los 20 ítems de prioridad alta (que representan el 59,19% del valor) que efectivamente lo requieren por su criticidad operacional, mientras que se evita sobredimensionar los inventarios de consumibles de baja severidad que, aunque costosos en términos agregados, no comprometen la operación si experimentan quiebres temporales.

Fase 4: Modelo probabilístico de reposición

La Fase 4 determina los parámetros de reposición que sostienen la disponibilidad operativa del inventario MRO. Para ello, utiliza como insumos la segmentación ABC-XYZ (Fase 2) y la priorización por criticidad NPR (Fase 3). Con base en estos resultados, se aplica una metodología diferenciada por segmento, de acuerdo con el nivel de impacto económico y riesgo operacional.

El dimensionamiento del stock de seguridad (SS) y del punto de reorden (ROP) constituye el núcleo técnico del sistema, ya que define el momento y la magnitud de reposición por ítem. A diferencia de enfoques determinísticos, la formulación probabilística incorpora la variabilidad observada en el consumo de repuestos y en el lead time. Esta variabilidad se asocia a eventos no programados de mantenimiento y a fluctuaciones de abastecimiento.

La parametrización se ejecuta mediante modelación probabilística completa para los veinticuatro ítems de Clase A, que concentran la mayor proporción del valor anual del inventario. En estos ítems, el SS se estima a partir de la dispersión empírica del consumo mensual y del comportamiento del lead time, alineado al nivel de servicio definido por criticidad. Para segmentos de menor criticidad, se emplean aproximaciones determinísticas con márgenes conservadores, con el fin de evitar sobreinventario en componentes de bajo impacto.

Actividades de parametrización estocástica (SS y ROP)

Actividad 1: Cálculo de la demanda promedio

La demanda promedio es el parámetro base del modelo de reposición, ya que estima el consumo esperado de cada ítem en el horizonte de análisis. Para cada ítem i , la demanda

promedio mensual μ_i se obtiene como el promedio aritmético de los consumos mensuales observados en los últimos doce meses, conforme la siguiente ecuación.

$$\mu_i = \left(\frac{1}{12}\right) \times \sum D_{i,t} \quad (12)$$

Aquí, μ_i representa la demanda promedio mensual del ítem i (unid/mes) y $D_{i,t}$ corresponde al consumo registrado del ítem i en el mes t . Este cálculo se aplica al catálogo normalizado de 60 ítems. En términos agregados, los resultados evidencian una dispersión marcada entre ítems, consistente con la naturaleza del inventario MRO, donde coexisten consumibles de alta rotación con componentes críticos de baja rotación; en el conjunto analizado, el promedio de μ_i fue 27,83 unid/mes y su desviación estándar 42,15 unid/mes, confirmando heterogeneidad y variabilidad operativa.

Actividad 2: Determinación de la desviación estándar

La desviación estándar caracteriza la dispersión del consumo mensual respecto de la demanda promedio y constituye el parámetro determinante del stock de seguridad, al capturar la magnitud de las fluctuaciones no previstas. Para cada ítem i , la desviación estándar mensual σ_i se estima mediante la varianza muestral insesgada, considerando $n = 12$ observaciones mensuales, según la siguiente ecuación.

$$\sigma_i = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{11}\right) \times \sum (D_{i,t} - \mu_i)^2\right]} \quad (13)$$

Aquí, σ_i se expresa en unidades por mes, $D_{i,t}$ corresponde al consumo del mes t , y el denominador 11 responde al ajuste $n - 1$ propio del estimador insesgado en muestras finitas.

En el catálogo analizado, la distribución de σ_i presenta una mediana de 2,68 unid/mes y un rango intercuartílico de 1,15 a 5,85 unid/mes. Los ítems clasificados como Z exhiben mayor variabilidad, con σ_i entre 2,87 y 8,45 unid/mes, mientras que los ítems X mantienen dispersiones acotadas, entre 1,12 y 2,75 unid/mes. Esta separación empírica respalda la clasificación XYZ definida en la Fase 2 y sustenta el uso de parametrización probabilística reforzada en segmentos de alta variabilidad.

Actividad 3: Cálculo del stock de seguridad (SS)

El stock de seguridad representa el inventario adicional requerido para cubrir la incertidumbre del consumo durante el lead time y cumplir el nivel de servicio objetivo definido

por criticidad. Para cada ítem i con nivel de servicio NS_i , el stock de seguridad se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$SS_i = Z(NS_i) \sigma_i \sqrt{LT_i} \quad (14)$$

Aquí, SS_i es el stock de seguridad (unidades), $Z(NS_i)$ es el factor de seguridad asociado al nivel de servicio, σ_i es la desviación estándar mensual del consumo y LT_i es el lead time promedio expresado en meses (consistente con la unidad de σ_i).

El factor Z se determina como el cuantil del normal estándar asociado al nivel de servicio ($Z = \Phi^{-1}(NS_i)$). Para los niveles establecidos en la Fase 3, se adoptan: $Z(98\%) = 2,05$, $Z(95\%) = 1,65$, $Z(90\%) = 1,28$ y $Z(85\%) = 1,04$. En ítems de prioridad alta con demanda errática (segmento A–Z), se aplica un ajuste conservador del 10% sobre Z ($Z = 2,26$) para robustecer la protección ante desviaciones del supuesto de normalidad.

En el caso de estudio, sobre el catálogo se generó un stock de seguridad total de 148 unidades, valorizado en 49.147,20 USD (10,07% del valor anual del inventario). La asignación se concentra en los segmentos de mayor criticidad: los nueve ítems de prioridad alta y clase A acumulan 28 unidades valorizadas en 36.691,89 USD (74,66% del valor del SS), mientras que los dieciocho ítems de clase C y prioridad baja concentran 23 unidades con 771,13 USD (1,57% del valor del SS).

Actividad 4: Cálculo del punto de reorden (ROP)

El punto de reorden establece el umbral de inventario que activa la reposición, con el objetivo de que la recepción ocurra antes del agotamiento del stock. Este parámetro integra la demanda esperada durante el lead time y el stock de seguridad previamente dimensionado. Para cada ítem i , el punto de reorden se calcula mediante la ecuación siguiente ecuación.

$$ROP_i = (\mu_i \times LT_i) + SS_i \quad (15)$$

En este contexto, ROP_i se expresa en unidades, $\mu_i LT_i$ representa el consumo esperado durante el período de reposición (con LT_i en unidades temporales consistentes con μ_i), y SS_i aporta la protección frente a la variabilidad del consumo.

En el caso de estudio, el cálculo de ROP_i para el catálogo de HIDRO S.A. generó un punto de reorden agregado de 335 unidades, valorizado en 104.821,44 USD. La distribución presenta asimetría marcada, con mediana de 4 unidades por ítem; además, el 75% de los ítems registra $ROP_i < 9$ unidades, mientras que el decil superior alcanza valores entre 21 y 25 unidades. Los consumibles de alta rotación y lead time corto (por ejemplo, filtros con $LT = 7$ días) muestran ROP_i del orden de 11–12 unidades, mientras que componentes críticos con lead

times prolongados (por ejemplo, bombas hidráulicas con $LT = 45$ días) mantienen ROP_i reducidos (2–3 unidades) debido a su demanda mensual inferior a una unidad.

Actividad 5: Definición del nivel de servicio por segmento

El nivel de servicio objetivo NS_i se asigna de forma diferenciada según el segmento combinado ABC–NPR, con el fin de equilibrar el costo de mantenimiento de inventario frente al riesgo operacional de quiebre. La asignación se fundamenta en la matriz de niveles de servicio definida en la Fase 3, donde los ítems de prioridad alta se fijan en $NS = 98\%$, independientemente de su clase ABC, debido a su impacto directo sobre la continuidad operativa.

En el catálogo analizado, la distribución de niveles de servicio fue: 17 ítems con $NS = 98\%$ (prioridad alta), 9 ítems con $NS = 95\%$ (prioridad media y clase A), 19 ítems con $NS = 90\%$ (prioridad media en clases B/C y prioridad baja en clase A) y 15 ítems con $NS = 85\%$ (prioridad baja en clases B/C). Esta segmentación orienta la inversión de capital hacia los repuestos con mayor exposición al riesgo, evitando criterios uniformes de servicio que generan sobreinventario en componentes de baja criticidad y, simultáneamente, insuficiente protección en ítems de alta prioridad.

SALIDA

Parámetros óptimos de inventario por ítem

La parametrización de la Fase 4 genera, para cada uno de los 60 ítems del catálogo normalizado, un conjunto consistente de parámetros de reposición ($\mu_i, \sigma_i, LT_i, SS_i, ROP_i$) que habilita su implementación operativa y automatización en el sistema de gestión. Con el fin de evidenciar la aplicación del modelo sobre el tramo de mayor exposición, la Tabla 30 presenta los 15 ítems con mayor ROP valorizado, incluyendo su clase combinada, prioridad, demanda media, dispersión, lead time, stock de seguridad y punto de reorden.

Tabla 30 Parámetros de reposición para los 15 ítems de mayor ROP valorizado.

Item_ID	Descripción	Clase	Prior.	μ (un/mes)	σ (un/mes)	LT (días)	SS (un)	ROP (un)
IT_038	BOMBA HIDRÁULICA PRINCIPAL	A-Z	Alta	0.83	0.39	45	1	2
IT_042	MOTOR HIDRÁULICO TRASLACIÓN	A-Z	Alta	0.67	0.65	45	2	3
IT_052	INYECTOR (UNIDAD)	A-Z	Alta	2.00	1.91	45	5	8
IT_050	BOMBA DE AGUA	A-Z	Alta	0.92	0.67	45	2	3

Item_ID	Descripción	Clase	Prior.	μ (un/mes)	σ (un/mes)	LT (días)	SS (un)	ROP (un)
IT_060	MÓDULO ECU	A-Z	Alta	0.50	0.52	45	1	2
IT_059	TURBOCOMPRESOR	A-Z	Alta	1.08	0.72	45	3	5
IT_046	ENFRIADOR ACEITE HIDRÁULICO	A-Z	Alta	1.50	0.90	45	3	5
IT_040	VÁLVULA DIRECCIONAL HIDRÁULICA	A-Z	Alta	1.75	1.29	45	4	7
IT_043	MOTOR HIDRÁULICO DE GIRO	B-Z	Alta	0.58	0.51	45	1	2
IT_039	BOMBA ENGRANAJES AUXILIAR	B-Z	Alta	0.83	0.72	45	1	2
IT_051	BOMBA DE COMBUSTIBLE	B-Z	Alta	0.67	0.49	45	1	2
IT_057	RADIADOR	B-Z	Alta	0.50	0.52	45	1	2
IT_025	EMPAQUE ACOPLE HIDRÁULICO	A-X	Alta	19.33	4.08	21	7	21
IT_041	VÁLVULA DE ALIVIO HIDRÁULICA	B-Z	Media	1.25	0.97	45	2	4
IT_026	KIT SELLOS CILINDRO BRAZO	B-Z	Alta	1.75	1.54	30	3	5

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

A partir de la Tabla 30 se observa un comportamiento diferenciado por segmento. Los componentes críticos de baja rotación (por ejemplo, ítems A–Z con prioridad alta) presentan μ_i reducida y LT_i prolongado, lo que produce ROP_i bajo en unidades; sin embargo, su impacto económico es elevado por el alto costo unitario. En contraste, ítems de alta rotación y prioridad alta (por ejemplo, A–X) concentran ROP_i en unidades significativamente mayores, coherente con su consumo sostenido, aun cuando el ROP_i/μ_i sea relativamente menor.

Distribución agregada por segmento ABC–NPR

El comportamiento agregado de los parámetros se resume en la Tabla 31, que presenta la distribución de SS y ROP por segmento ABC–NPR, tanto en unidades como valorizado. Esta agregación permite verificar que la inversión en inventario de protección se concentra en los cuadrantes de mayor riesgo e impacto económico.

La Tabla 31 confirma la concentración en el segmento A–Alta, que con 9 ítems acumula 28 unidades de SS valorizadas en 36.691,89 USD, y 56 unidades de ROP valorizadas en 63.192,77 USD. La relación $SS/ROP = 0,50$ en este segmento refleja que una fracción

relevante del umbral de reposición corresponde a protección frente a variabilidad. Por su parte, los segmentos B–Baja y C–Baja concentran unidades de *SS* comparables, pero con valorización baja, consistente con su menor costo unitario y menor prioridad operativa.

Tabla 31 Distribución agregada de parámetros *SS* y *ROP* por segmento ABC-NPR.

Segmento	No. ítems	SS Total (unidades)	ROP Total (unidades)	SS Valorizado (USD)	ROP Valorizado (USD)
A-Alta	9	28	56	36,691.89	63,192.77
A-Media	3	15	34	761.71	1,707.87
A-Baja	3	8	28	616.45	2,263.11
B-Alta	7	14	24	8,146.05	14,559.67
B-Media	6	14	31	3,230.92	6,705.04
B-Baja	11	24	81	691.47	2,590.94
C-Alta	1	2	3	376.16	564.24
C-Media	6	20	43	778.64	1,694.76
C-Baja	14	23	81	771.13	2,249.03

Elaborador por: Duche, Carlos (2026).

La Figura 24 sintetiza la concentración del inventario de seguridad y del punto de reorden por segmento. La Figura 25 complementa la validación mediante estadísticos comparativos (boxplots) de μ , σ , *SS* y *ROP* por clasificación, evidenciando la heterogeneidad del portafolio y la coherencia del esquema de segmentación.

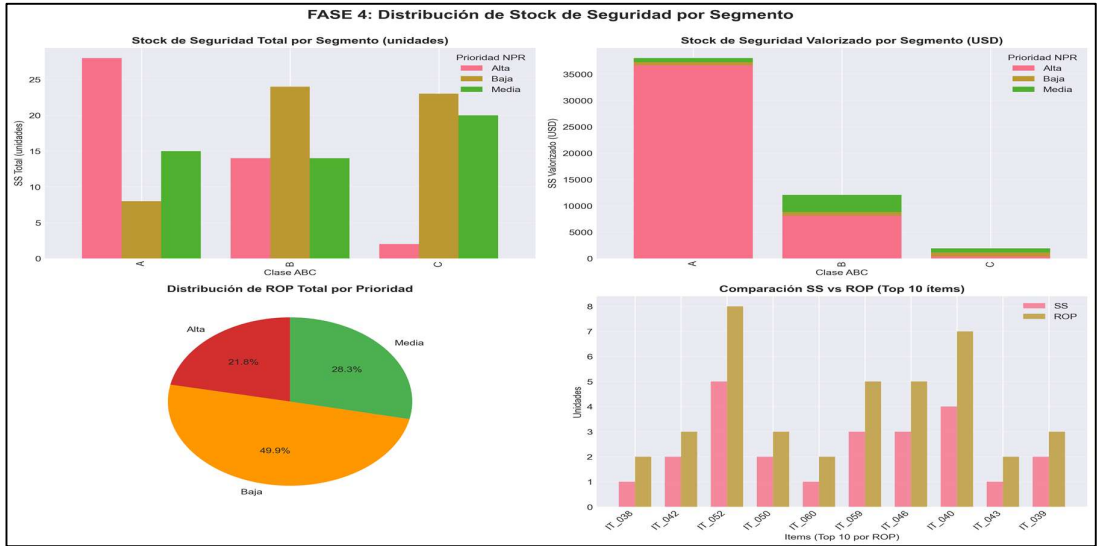


Figura 24 Distribución del stock de seguridad y punto de reorden por segmento ABC-NPR. Elaborado por Duche, Carlos (2026).

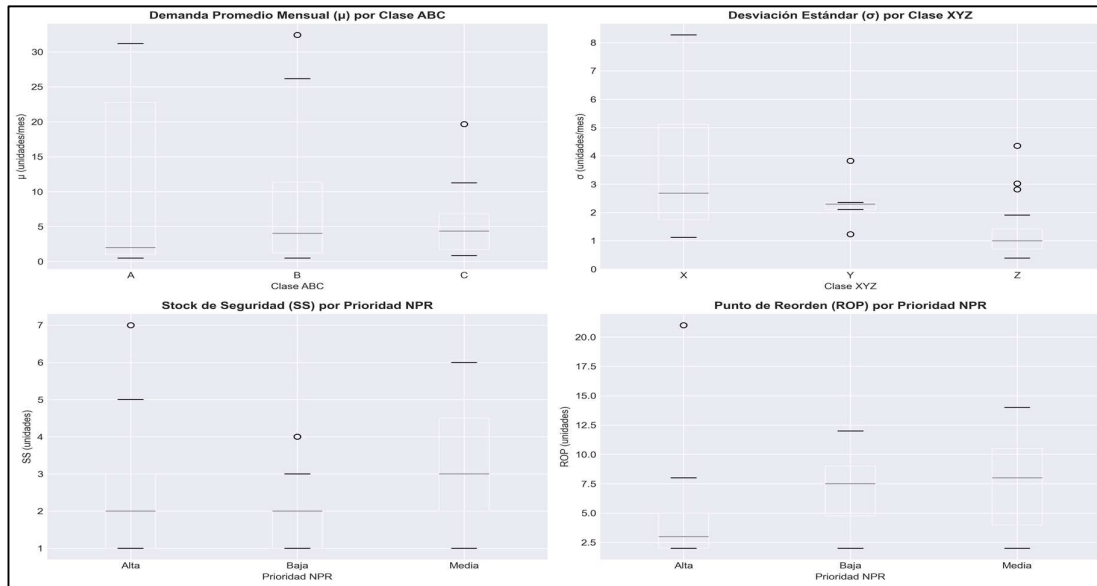


Figura 25 *Análisis comparativo de parámetros de reposición por clasificación.*
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Fase 5 – Parametrización de políticas de inventario

La Fase 5 representa la etapa central de operacionalización del sistema de gestión de inventarios. A partir de los resultados obtenidos en las fases previas (clasificación ABC, segmentación XYZ y priorización NPR) se procede a la asignación diferenciada de políticas de control de inventario para cada uno de los 60 ítems que conforman el catálogo de repuestos críticos.

El propósito de esta fase es transformar los datos de segmentación en reglas operativas concretas: cuándo revisar el stock, cuánto pedir y cuál es el nivel objetivo de inventario para cada ítem. Esto garantiza que los recursos disponibles se destinen con mayor intensidad a los ítems de mayor criticidad, al tiempo que se reduce la carga administrativa en los ítems de menor impacto.

Actividades de implementación operativa

Actividad 1: Asignación de Política Diferenciada por Segmento

La asignación de políticas sigue una lógica estructurada que combina tres dimensiones de clasificación:

- Clase ABC: determina la importancia económica del ítem (A = alta, B = media, C = baja).
- Clase XYZ: refleja la predictibilidad de la demanda (X = regular, Y = variable, Z = irregular).

- Prioridad NPR: evalúa el impacto operacional, calculado como $NPR = Severidad \times Ocurrencia \times Detectabilidad$.

La combinación de estas tres dimensiones derivó en la lógica de asignación expuesto en la Tabla 32.

Tabla 32 Matriz de asignación de políticas por segmento ABC-NPR.

Clase	Prioridad	Política	No.	Tipo Alerta	Descripción
A	Alta	Continua (R,Q)	9	Automática (ROP)	Pedido fijo Q al alcanzar ROP
A	Media	Continua (R,Q)	3	Automática (ROP)	Pedido fijo Q al alcanzar ROP
A	Baja	Periódica (T,S)	2	Manual T=30 días	Revisión mensual hasta S
A	Baja	Continua (R,Q)	1	Automática (ROP)	Pedido fijo Q al alcanzar ROP
B	Alta	Periódica (T,S)	7	Manual T=7 días	Revisión semanal hasta S
B	Media	Periódica (T,S)	6	Manual T=30 días	Revisión mensual hasta S
B	Baja	Periódica (T,S)	11	Manual T=30 días	Revisión mensual hasta S
C	Alta	Periódica (T,S)	1	Manual T=7 días	Revisión semanal hasta S
C	Media	Periódica (T,S)	6	Manual T=15 días	Revisión quincenal hasta S
C	Baja	Periódica (T,S)	14	Manual T=30-60 días	Revisión mensual/bimestral

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La Figura 26 visualiza la misma distribución mediante un mapa de calor, evidenciando que la política continua (R, Q) se concentra en el segmento A–Alta y que el esquema periódico (T, S) domina en las clases B y C.

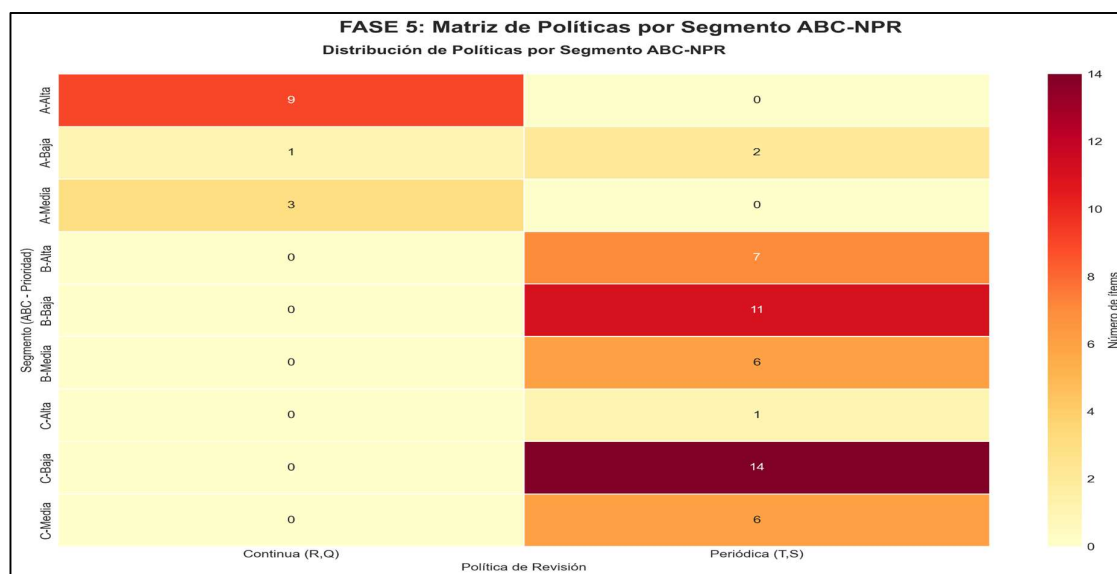


Figura 26 Matriz de políticas por segmento ABC–NPR (mapa de calor).

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Actividad 2: Definición de revisión periódica o continua

Se formalizan dos políticas de reposición. La política de revisión continua (R, Q) opera con disparo por punto de reorden y cantidad fija de pedido. La política de revisión periódica (T, S) opera mediante inspecciones programadas y reposición hasta un nivel objetivo.

Política continua (R, Q): cuando la posición de inventario es menor o igual al punto de reorden (ROP), se emite una orden por una cantidad fija Q. Para fines operativos, se define mediante la siguiente expresión.

$$\text{Min} = \text{ROP} \text{ \& \& Max} = \text{ROP} + Q \quad (16)$$

Política periódica (T, S): cada T días se revisa el ítem y, si la posición de inventario es menor o igual al umbral Min, se repone hasta el nivel objetivo S. En la parametrización, se adopta $\text{Min} = \text{ROP}$ y $\text{Max} = S$, con la condición de consistencia $\text{Max} \geq \text{Min}$.

La Figura 27 presenta la distribución global de políticas. El catálogo se estructura con 13 ítems (21,7%) bajo revisión continua (R, Q) y 47 ítems (78,3%) bajo revisión periódica (T, S), lo que limita la complejidad operativa a los ítems de mayor criticidad e impacto económico.

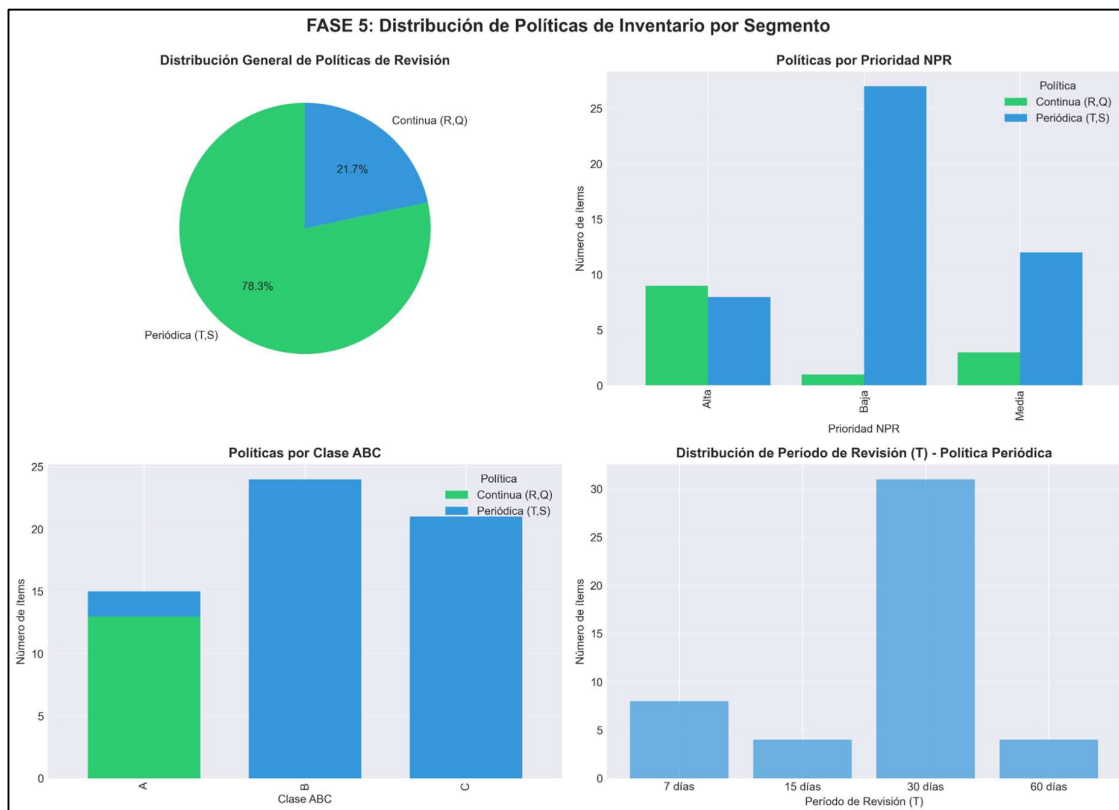


Figura 27 Distribución de políticas de inventario por clase ABC y prioridad NPR. Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Actividad 3: Establecimiento de reglas de control

Las políticas se convierten en reglas de control configurables en el sistema (Tabla 33). Para la revisión continua, la regla operativa se expresa como: emitir pedido Q cuando el inventario $\leq ROP$, con nivel objetivo $Max = ROP + Q$. Para la revisión periódica, la regla operativa se expresa como: revisar cada T días y ordenar hasta $Max = S$ cuando el inventario $\leq Min$. En ambos casos se definieron alertas: (i) alerta automática preventiva al 120% del ROP para ítems en revisión continua y (ii) alerta manual asociada al calendario de revisión para ítems con política periódica.

Tabla 33 Reglas de control por tipo de política de revisión.

Tipo de Política	Momento de Revisión	Tipo Alerta	Cantidad a Pedir	Aplicación
Revisión Continua (R, Q)	Cuando inventario $\leq ROP$	Automática	Q fijo calculado (EOQ ajustado)	Min=ROP; Max=ROP+Q
Periódica T=7 días	Cada 7 días (semanal)	Manual	Hasta S (Max)	Alta criticidad B-Z y C-Z alta prioridad
Periódica T=15 días	Cada 15 días (quincenal)	Manual	Hasta S (Max)	Ítems C-Y y B-Y media prioridad
Periódica T=30 días	Cada 30 días (mensual)	Manual	Hasta S (Max)	La mayoría de los ítems B y C baja prioridad
Periódica T=60 días	Cada 60 días (bimestral)	Manual	Hasta S (Max)	Ítems C de muy baja rotación

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Las reglas garantizan que:

- Ningún ítem quede sin stock de seguridad, independientemente de su clase.
- Los ítems con demanda irregular (clase Z) reciben mayor atención de revisión.
- La parametrización Min-Max permite identificar desviaciones del inventario ideal.
- Las alertas automáticas (política continua) o manuales (política periódica) se activan en el momento adecuado.

La Figura 28 compara la demanda anual y los parámetros promedio por tipo de política. Los ítems bajo revisión continua presentan, en promedio, mayores valores de demanda y mayores niveles objetivo de inventario, coherente con su asignación a segmentos de mayor exposición.

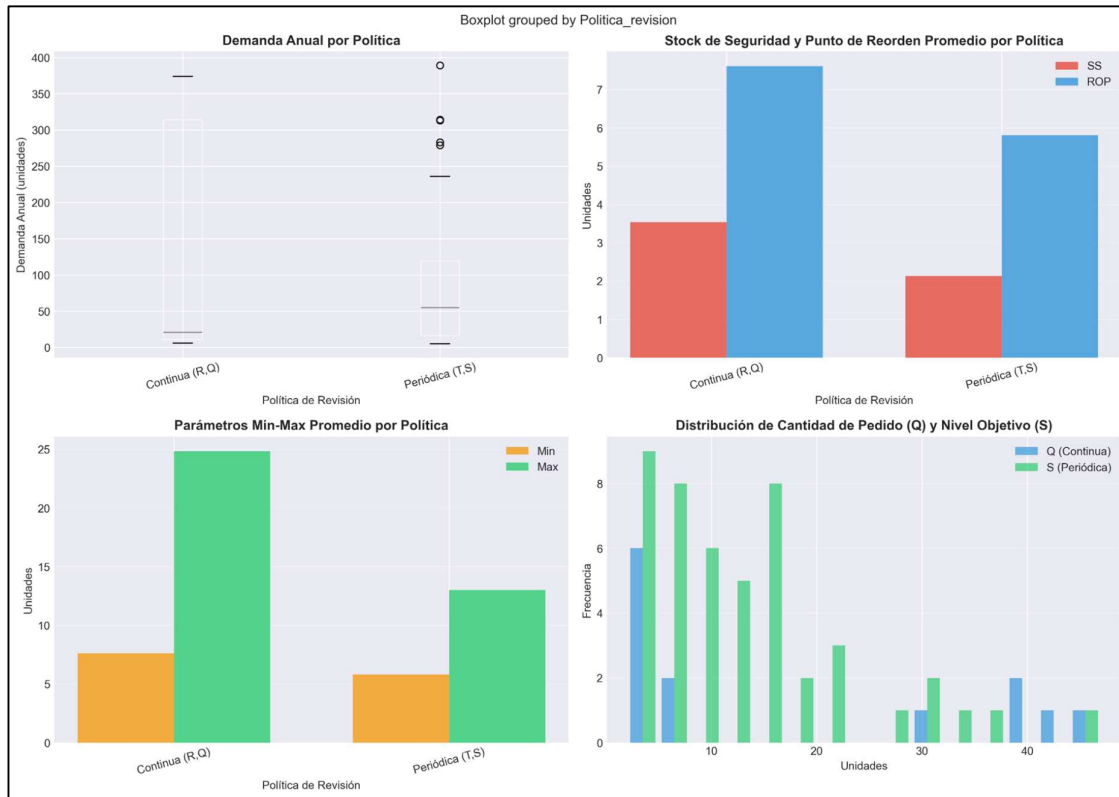


Figura 28 Comparación de demanda y parámetros promedio por tipo de política.
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Salida: Matriz de políticas operativas

A continuación, en la Tabla 34, se presenta la Matriz de Políticas Operativas completa para los 60 ítems del sistema. Para cada ítem se especifican: la política de revisión asignada, el período T (en días, para revisión periódica), la cantidad de pedido Q (para revisión continua), el nivel objetivo S (para revisión periódica), y los límites Min y Max del inventario.

Tabla 34 Matriz de Políticas Operativas – 60 ítems (T = período revisión periódica; Q = cantidad pedido continuo; S = nivel objetivo periódico).

ID	Descripción	ABC	XYZ	NPR	Política	T(días)	Q(ud)	S(ud)	Min	Max
IT_048	ALTERNADOR	B	Z	Media	Periódica (T,S)	30	—	4	2	4
IT_046	ENFRIADOR	A	Z	Alta	Continua (R,Q)	—	4	—	5	9
IT_050	BOMBA AGUA	A	Z	Alta	Continua (R,Q)	—	3	—	3	6
IT_025	EMPAQUE	A	X	Alta	Continua (R,Q)	—	29	—	21	50

ID	Descripción	ABC	XYZ	NPR	Política	T(días)	Q(ud)	S(ud)	Min	Max
IT_060	ECU	A	Z	Alta	Continua (R,Q)	—	2	—	2	4
IT_040	VÁLVULA	A	Z	Alta	Continua (R,Q)	—	5	—	7	12
IT_012	FILTRO REF	A	X	Media	Continua (R,Q)	—	42	—	12	54
IT_002	FILTRO COMB	A	X	Media	Continua (R,Q)	—	47	—	11	58
IT_010	FILTRO CAB	A	X	Media	Continua (R,Q)	—	40	—	11	51
IT_018	MANGUERA RET	A	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	16	8	16
IT_024	ABRAZADERA	A	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	22	11	22
IT_041	VÁLVULA ALI	B	Z	Media	Periódica (T,S)	30	—	5	4	5
IT_013	FILTRO DIR	A	X	Baja	Continua (R,Q)	—	39	—	9	48
IT_043	MOTOR GIRO	B	Z	Alta	Periódica (T,S)	7	—	2	2	2
IT_020	MANGUERA INF	B	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	20	9	20
IT_004	FILTRO HID RET	B	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	19	5	19
IT_022	ACOPLE RÁP	B	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	20	9	20
IT_006	FILTRO AIRE	B	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	34	8	34
IT_001	FILTRO ACEI	B	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	35	9	35
IT_003	FILTRO SEC	B	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	31	8	31
IT_007	FILTRO AIRE 2	B	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	14	3	14
IT_045	KIT BOMBA	B	Z	Media	Periódica (T,S)	30	—	13	9	13
IT_019	MANGUERA SUP	B	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	13	6	13
IT_015	FILTRO VENT	B	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	13	3	13
IT_044	CILINDRO	B	Z	Media	Periódica (T,S)	30	—	6	4	6

ID	Descripción	ABC	XYZ	NPR	Política	T(días)	Q(ud)	S(ud)	Min	Max
IT_054	SENSOR POS	C	Y	Media	Periódica (T,S)	15	—	13	10	13
IT_009	FILTRO TRANS	B	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	44	12	44
IT_049	MOTOR ARR	B	Z	Media	Periódica (T,S)	30	—	5	4	5
IT_035	PASADOR	B	Y	Media	Periódica (T,S)	15	—	10	7	10
IT_005	FILTRO PRES	B	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	31	9	31
IT_047	SENSOR PRES	B	Z	Alta	Periódica (T,S)	7	—	7	6	7
IT_032	RODAMIENTO	C	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	15	4	15
IT_038	BOMBA PRIN	A	Z	Alta	Continua (R,Q)	—	2	—	2	4
IT_017	MANGUERA BP	C	Y	Baja	Periódica (T,S)	60	—	7	9	7
IT_008	FILTRO SEP	C	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	17	5	17
IT_027	KIT SELLOS	C	Z	Alta	Periódica (T,S)	7	—	4	5	4
IT_058	TERMOSTATO	C	Y	Media	Periódica (T,S)	15	—	14	10	14
IT_023	CONECTOR 90	C	Y	Baja	Periódica (T,S)	30	—	9	6	9
IT_021	MANGUERA COMB	C	Z	Baja	Periódica (T,S)	60	—	10	4	10
IT_026	KIT BRAZO	B	Z	Alta	Periódica (T,S)	7	—	5	5	5
IT_055	CORREA ALT	C	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	14	9	14
IT_059	TURBO	A	Z	Alta	Continua (R,Q)	—	3	—	5	8
IT_011	FILTRO RESP	C	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	27	7	27
IT_042	MOTOR TRAS	A	Z	Alta	Continua (R,Q)	—	2	—	3	5
IT_016	MANGUERA AP	C	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	14	9	14
IT_052	INYECTOR	A	Z	Alta	Continua (R,Q)	—	6	—	8	14

ID	Descripción	ABC	XYZ	NPR	Política	T(días)	Q(ud)	S(ud)	Min	Max
IT_037	SELLO TRANS	C	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	15	4	15
IT_034	BUJE ART	C	Z	Media	Periódica (T,S)	30	—	8	6	8
IT_057	RADIADOR	B	Z	Alta	Periódica (T,S)	7	—	2	2	2
IT_036	SELLO BOMBA	C	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	12	3	12
IT_028	RETÉN EJE	C	Z	Media	Periódica (T,S)	15	—	8	6	8
IT_051	BOMBA COMB	B	Z	Alta	Periódica (T,S)	7	—	2	2	2
IT_014	FILTRO ACEI T	C	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	10	3	10
IT_053	SENSOR TEMP	C	X	Baja	Periódica (T,S)	30	—	16	10	16
IT_030	SELLO ORING	C	Z	Media	Periódica (T,S)	30	—	4	3	4
IT_056	CORREA VENT	C	Z	Baja	Periódica (T,S)	60	—	6	3	6
IT_033	RODAMIENTO AG	C	Z	Baja	Periódica (T,S)	60	—	5	2	5
IT_029	RETÉN CUBO	C	Z	Media	Periódica (T,S)	30	—	4	2	4
IT_039	BOMBA AUX	B	Z	Alta	Periódica (T,S)	7	—	2	2	2
IT_031	EMPAQUE MOT	B	Z	Alta	Periódica (T,S)	7	—	4	4	4

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Fase 6 – Diseño e integración GMAO/CMMS

La Fase 6 operacionaliza el diseño e integración de un sistema GMAO/CMMS que automatiza el control de inventarios MRO y habilita la trazabilidad completa de las transacciones entre los dominios de mantenimiento, inventario/bodega y compras. Esta fase constituye el enlace de implementación que traduce los parámetros definidos en etapas previas (clasificación ABC-XYZ-NPR, stock de seguridad (*SS*) y punto de reorden (*ROP*) en reglas ejecutables dentro de un entorno digital con monitoreo en tiempo real.

El diagnóstico AS-IS evidenció un desempeño insuficiente del sistema vigente, caracterizado por un nivel promedio de trazabilidad del 12% sobre variables críticas del modelo, una tasa de quiebre del 27,7% y 44,7 horas mensuales perdidas por faltantes de

repuestos. Esta condición compromete la sostenibilidad del mantenimiento preventivo, debido a que las decisiones de reposición se sustentan en registros descriptivos no estructurados y sin parametrización por ítem. En particular, la ausencia de vinculación entre órdenes de trabajo (OT), consumo de repuestos y saldos de inventario amplifica la discrepancia entre stock teórico y stock real, excediendo la capacidad de control manual.

En el escenario TO-BE, se establece como requisito mínimo que cada consumo de repuesto quede obligatoriamente asociado a una OT, a un equipo identificado y a un ítem codificado en el catálogo. Esta trazabilidad obligatoria habilita la aplicación efectiva de *SS* y *ROP*, además, soporta la generación de alertas automáticas de reposición. La Tabla 35 sintetiza las siete actividades de la Fase 6, incluyendo responsables y carga de trabajo conforme al cronograma de implementación.

Tabla 35 *Resumen de actividades, responsables y Horas-Hombre de la Fase 6.*

Cod.	Actividad	Responsable principal	HH / Semana
A1	Configuración del catálogo digital MRO	Analista Inventarios + Bodega	30 HH – S1
A2	Clasificación ABC-XYZ y normalización del catalogo	Analista Inventarios + Sup. Bodega	24 HH – S2
A3	Calculo NPR y niveles de servicio objetivo	Mantenimiento + Analista	18 HH – S3
A4	Parametrización de SS y ROP por ítem	Analista Inventarios + Compras	16 HH – S4
A5	Configuración GMAO/CMMS y alertas automáticas (CRITICO)	TI + Analista Inventarios	36 HH – S4-S5
A6	Capacitación y ejecución de piloto preventivo	Capacitación + Piloto	18 HH – S6
A7	Seguimiento, ajuste e institucionalización	Analista + Jefaturas	20 HH – S7-S8

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La secuencia de actividades responde a un encadenamiento lógico estricto: A1 constituye el prerrequisito de A2; A2, el de A3; A3, el de A4; y A4, el de A5. A su vez, las actividades A6 y A7 se ejecutan sobre el sistema implementado en A5, con el fin de validar su funcionamiento y ajustarlo mediante retroalimentación operativa. Esta dependencia secuencial implica que cualquier retraso en las actividades iniciales, en la depuración del catálogo, afecta de forma directa el hito crítico de configuración del sistema GMAO/CMMS.

Actividad 1: Configuración del Catalogo Digital MRO

La configuración del catálogo digital MRO constituye el prerrequisito de la integración GMAO/CMMS. La presencia de códigos duplicados, descripciones inconsistentes o unidades

de medida heterogéneas distorsiona el cálculo del valor anual de consumo y deriva en segmentaciones incorrectas en la clasificación ABC-XYZ; en consecuencia, se compromete la validez de los parámetros *SS* y *ROP* calculados sobre dicha base. La actividad A1 requiere 30 HH, distribuidas entre el Analista de Inventarios (20 HH) y el área de Bodega (10 HH), durante la primera semana de implementación.

El criterio de normalización establece que cada ítem del catálogo debe disponer de un identificador único (*Item_ID*), una unidad de medida estandarizada y un campo de equivalencias que registre marcas alternativas autorizadas y sus condiciones de uso. Además, el catálogo debe incorporar la clasificación ABC-XYZ obtenida en fases previas, así como los parámetros de control *SS*, *ROP*, mínimo, máximo y nivel objetivo definidos para cada ítem. Esta integración convierte el catálogo en el punto de partida operativo del GMAO/CMMS, ya que habilita la imputación consistente de consumos, movimientos y reposiciones; sin un catálogo validado, las transacciones no pueden asociarse de forma fiable a los ítems del modelo.

El requerimiento funcional RF-01, detallado en la Tabla 36, formaliza las condiciones mínimas que el catálogo debe cumplir para habilitar la trazabilidad del sistema. Su validación constituye el primer hito de control antes de avanzar a la actividad A2.

Actividad 2: Requerimientos funcionales del sistema GMAO/CMMS

Desde la perspectiva operativa, el sistema GMAO/CMMS debe constituirse como el núcleo de integración entre tres dominios: mantenimiento (OT–BOM–consumo), inventario (kardex–parámetros–alertas) y compras (solicitud–OC–recepción). Esta integración exige que las transacciones se registren en tiempo real, con responsables identificables, a fin de asegurar consistencia entre consumo físico y registros del sistema. Bajo esta condición, los indicadores base (*NS*, *TQ*, *LT*, rotación, obsolescencia y capital inmovilizado) pueden calcularse de manera periódica y compararse antes y después de la intervención.

La Tabla 36 consolida los nueve requerimientos funcionales mínimos que garantizan la trazabilidad del sistema y habilitan la modelación probabilística de la demanda y del lead time. Cada requerimiento se especifica con un alcance mínimo verificable y con las variables del modelo que activa, lo que permite evaluar de forma directa la correspondencia entre el diseño del sistema y la formulación propuesta.

Tabla 36 *Requerimientos funcionales mínimos del GMAO/CMMS para inventarios MRO.*

Código	Requerimiento funcional	Alcance mínimo verificable	Variables habilitadas
RF-01	Catalogo MRO unificado	Codificación única, equivalencias originales/alternos, unidad de medida y familia ABC/XYZ	Item_ID, unidad, equivalencias, familia ABC/XYZ
RF-02	Gestion de OT	Creación, planificación, BOM de ítems requeridos, cierre y evidencias adjuntas	OT_ID, Equipo_ID, Item_ID, Q_sol
RF-03	Registro de consumos por OT	Imputación de la salida de inventario a la OT y equipo, con cantidades y fecha	Q_desp, Q_cons, fecha egreso, responsable
RF-04	Kardex en tiempo real	Entradas y salidas con usuario, fecha, ubicación física y saldo actualizado	Q_rec, Q_stock, ubicación, bitácora
RF-05	Parámetros por ítem	SS, PR/ROP, niveles mínimo, máximo y objetivo configurados por ítem	SS, PR/ROP, min-max, niveles objetivo
RF-06	Disparador de reposición	Alerta y solicitud automática generada al cruzar el PR/ROP en cada transacción de salida	Señal de reposición, Req_ID, umbral PR
RF-07	Lead time real	Calculo automático del LT desde la solicitud de compra hasta la recepción en bodega	t_sol, t_oc, t_rec, LT y su variabilidad
RF-08	Indicadores de desempeño	NS, TQ, rotación, obsolescencia y capital inmovilizado, calculables con periodicidad	NS, TQ, Rotación, Obsolescencia, CI
RF-09	Auditoria y trazabilidad	Bitácora de cambios y responsables identificables por cada transacción del sistema	Usuario, timestamp, historial de cambios

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La Figura 29 complementa la Tabla 36 al representar la cobertura de cada requerimiento funcional por módulo del GMAO/CMMS. La matriz evidencia que los módulos de kardex de inventario y OT/CMMS concentran la mayor cobertura, mientras que el dashboard de KPIs se orienta principalmente a RF-08 e integra de forma parcial RF-07 y RF-09. Esta distribución confirma que el desempeño del sistema no depende de un único módulo, sino de la articulación funcional entre los componentes que soportan el flujo completo mantenimiento–inventario–compras.

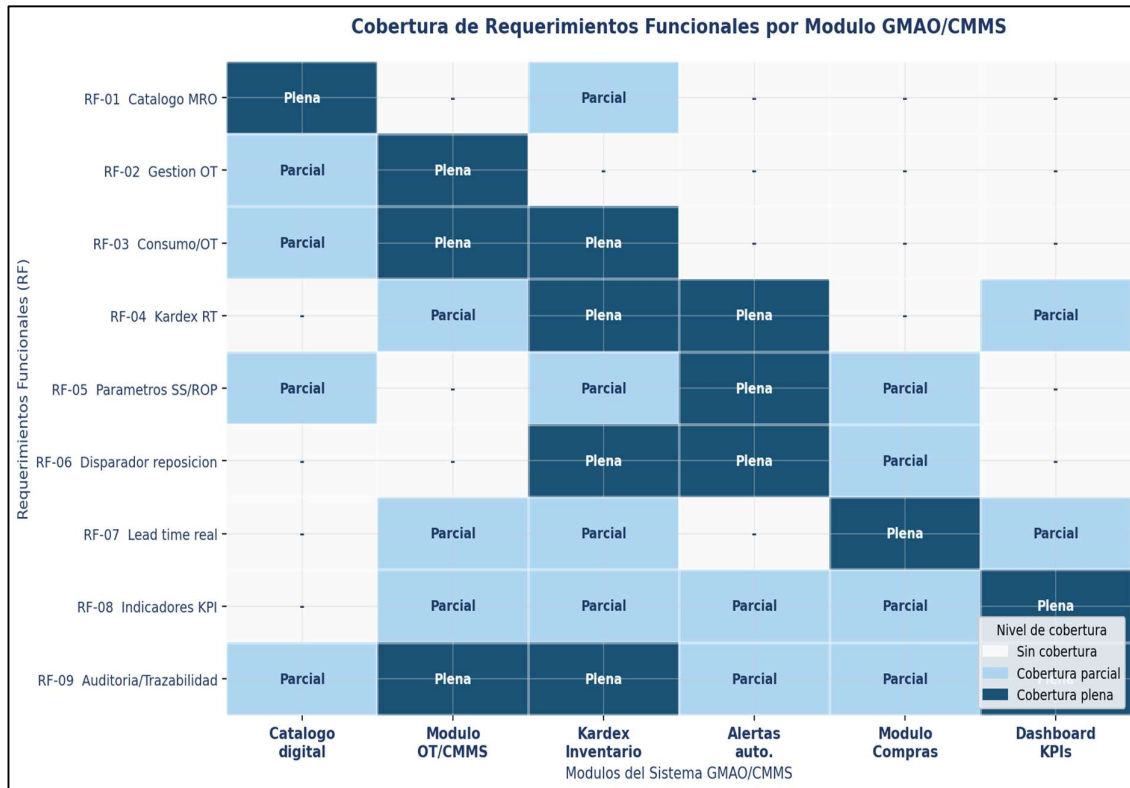


Figura 29 Cobertura de Requerimientos Funcionales RF-01 a RF-09 por módulo GMAO/CMMS.

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Actividad 3: Parametrización SS y ROP por Ítem

La parametrización de los niveles de control por ítem constituye la actividad central del modelo cuantitativo. Los parámetros *SS* y *ROP*, calculados de forma probabilística en la Fase 4 a partir de la distribución de la demanda histórica y de la variabilidad del lead time, se incorporan al GMAO/CMMS para que el sistema evalúe automáticamente el estado de cada ítem ante cada transacción de salida. Sin esta carga paramétrica, el sistema se reduce a un kardex digital sin capacidad de decisión operativa.

La Tabla 37 detalla los parámetros configurados para los 13 ítems de Clase A bajo política continua (R, Q), debido a su mayor criticidad operativa y a la necesidad de monitoreo en tiempo real. Para cada ítem se registran el stock de seguridad (*SS*), el punto de reorden (*ROP*), la cantidad de pedido (Q) y el nivel máximo de inventario ($Max = ROP + Q$), junto con su fundamento técnico. Por su parte, los 47 ítems restantes, clasificados en las clases B y C, operan bajo política periódica (T, S), con intervalos de revisión de 7, 15, 30 o 60 días, según su segmento de demanda y su nivel de criticidad.

Tabla 37 *Parámetros de control configurados en el GMAO – 13 ítems Clase A, Política Continua (R, Q).*

Ítem / Descripción	SS	ROP	Q pedido	Max.	Fundamento del parámetro
IT_025 EMPAQUE	7	21	29	50	Alta demanda y variabilidad de la demanda; mayor SS del catalogo
IT_002 FIL.COMB	4	11	47	58	Mayor cantidad de pedido Q; alta rotación como filtro principal
IT_012 FIL.REF	6	12	42	54	Filtro de alta rotación; consumo predecible en mantenimiento preventivo
IT_010 FIL.CAB	5	11	40	51	Consumo regular; LT estable que permite ROP moderado
IT_013 FIL.DIR	3	9	39	48	Demanda media con LT corto; Q elevado compensa baja frecuencia de pedido
IT_052 INYECTOR	5	8	6	14	Ítem critico; baja frecuencia de consumo, pero alto impacto operativo
IT_040 VALVULA	4	7	5	12	Componente critico NPR alto; SS elevado relativo a su Q de pedido
IT_046 ENFRIADOR	3	5	4	9	Bajo consumo; alta criticidad justifica SS proporcional al Q
IT_059 TURBO	3	5	3	8	Alto costo unitario; SS minimizado sin sacrificar nivel de servicio
IT_050 BOMBA AGUA	2	3	3	6	Consumo bajo y estable; parámetros conservadores por costo elevado
IT_042 MOT. TRAS.	2	3	2	5	Baja rotación; SS mínimo suficiente dado su LT controlado
IT_038 BOMBA PRIN	1	2	2	4	Ítem estratégico de baja rotación; ROP mínimo por alta controlabilidad del LT
IT_060 ECU	1	2	2	4	Componente electrónico critico; SS mínimo por restricción de costo y obsolescencia

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La Figura 30 representa de forma gráfica los parámetros consignados en la Tabla 37 mediante dos paneles complementarios. El panel izquierdo muestra, para cada ítem, las barras apiladas correspondientes al stock de seguridad (SS), a la zona comprendida entre SS, ROP, así como a la zona comprendida entre ROP y Max, lo que permite visualizar la estructura de cobertura y reposición de cada caso. Por su parte, el panel derecho presenta la relación entre el stock de seguridad (SS) y la cantidad de pedido (Q), incorporando una línea de tendencia ($r^2 = 0,37$) que evidencia la correlación positiva esperada: a mayor variabilidad de la demanda, mayor requerimiento de SS y, en consecuencia, mayor tamaño de pedido para amortiguar la incertidumbre durante el período de reposición.

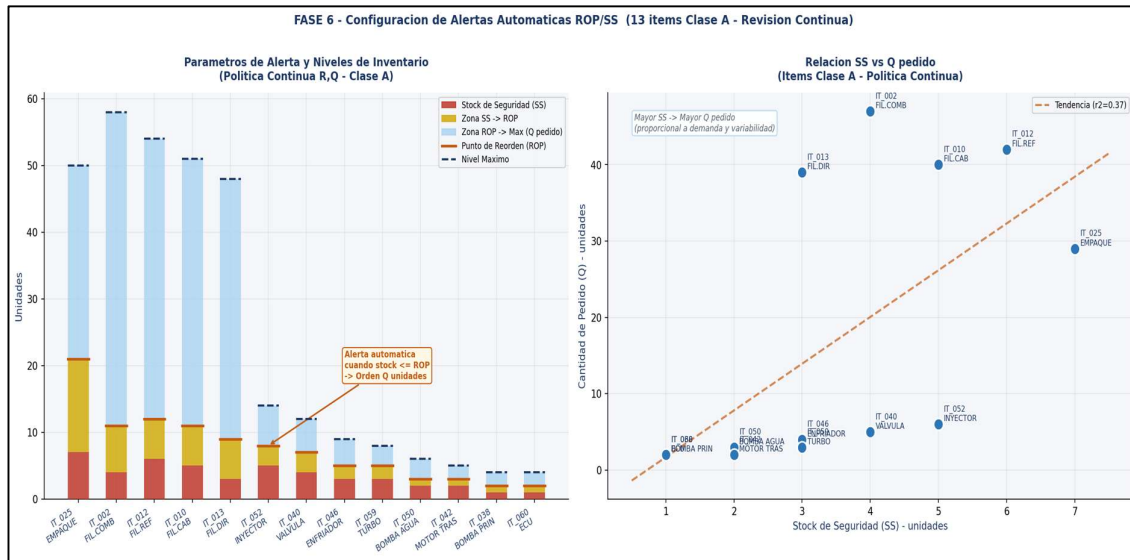


Figura 30 Configuración de alertas automáticas ROP/SS: parámetros de inventario por ítem Clase A (izquierda) y relación SS vs. cantidad de pedido Q (derecha).
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Actividad 4: Configuración de Alertas Automáticas

La configuración de alertas automáticas corresponde al requerimiento RF-06 y constituye la actividad de mayor complejidad técnica de la fase. Su ejecución demanda 36 HH, distribuidas entre TI (20 HH), el Analista de Inventarios (8 HH) y el área de Bodega (8 HH), durante las semanas S4 y S5. Sin este mecanismo, la parametrización de SS y ROP permanece como información estática, sin capacidad de activar decisiones operativas. En consecuencia, el GMAO/CMMS debe configurarse para comparar, en cada salida de inventario, el saldo resultante Q_{stock} con el umbral ROP del ítem y generar automáticamente una solicitud de reposición cuando $Q_{stock} \leq ROP$.

La lógica del disparador se ejecuta de forma secuencial. Al registrar un despacho (RF-03), el sistema actualiza el kardex en tiempo real (RF-04) y verifica si el nuevo Q_{stock} cruza el umbral de reposición. Cuando la condición se cumple, el GMAO/CMMS genera un Req_ID con el Item_ID, la cantidad recomendada Q, el proveedor preferente y el nivel objetivo de reposición. Esta solicitud queda visible para el responsable de Compras y para el Analista de Inventarios, mientras que el evento se registra en la bitácora con su marca temporal y el usuario que lo originó (RF-09).

En el caso de la política periódica, el sistema evalúa el nivel de inventario al inicio de cada período T y calcula el pedido necesario hasta alcanzar el nivel objetivo S, definido como la suma del stock de seguridad y de la demanda esperada durante $T + LT$. La Figura 31 resume

el flujo de información del modelo TO-BE, desde la apertura de la OT hasta la reposición en bodega, articulando las actividades de la fase en un proceso integrado y trazable. El esquema distingue tres eventos clave: la solicitud técnica en Mantenimiento, el movimiento físico en Bodega y el registro transaccional en el GMAO/CMMS. La sincronización de estas tres capas reduce la discrepancia entre el stock teórico y el stock real observada en el estado AS-IS.

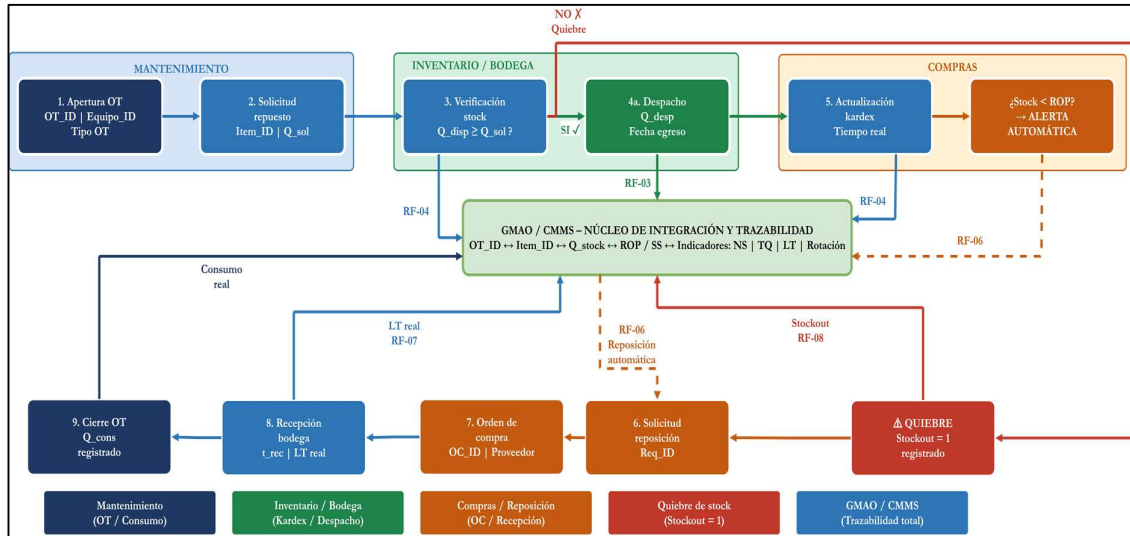


Figura 31 Flujo de integración trazable TO-BE: Mantenimiento → Inventario / Bodega → Compras, con GMAO/CMMS como núcleo de integración. Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Actividad 5: Integración Inventario, Mantenimiento y Compras

La integración de los tres dominios operativos mediante el GMAO/CMMS constituye la principal salida de la Fase 6. Este núcleo de integración se articula sobre dos llaves primarias, OT_ID e Item_ID, que vinculan el consumo, el saldo de inventario y la reposición dentro de un mismo rastro de datos auditable.

Esta arquitectura permite calcular, con consistencia, indicadores de desempeño como NS, TQ, LT, rotación, obsolescencia y capital inmovilizado. Ello es posible porque todos los eventos del ciclo quedan imputados a una misma transacción de origen, preservando la trazabilidad entre mantenimiento, bodega y compras.

La Figura 32 presenta el cronograma de implementación de las siete actividades distribuidas en ocho semanas. El diagrama permite identificar la ruta crítica (A1 → A2 → A3 → A4 → A5), los hitos de validación del modelo y la distribución temporal de la carga de trabajo por responsable.

En este esquema, la actividad A5 se extiende durante las semanas S4 y S5, coincidiendo con la mayor concentración de recursos del área de TI. Esta concentración es coherente con la

complejidad técnica de la configuración, la integración transaccional y la activación de las alertas automáticas del sistema.

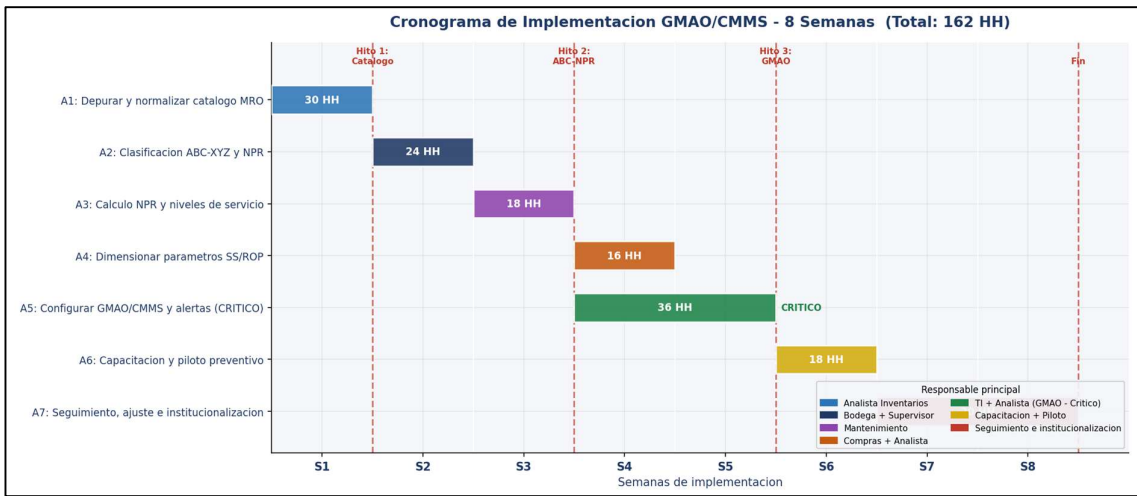


Figura 32 Cronograma de implementación GMAO/CMMS: 7 actividades en 8 semanas, 162 HH totales, con hitos de validación y ruta crítica. Elaborado por Duche, Carlos (2026).

La distribución de horas-hombre por rol y actividad se presenta en la Figura 33. El mapa de calor del panel izquierdo evidencia que el Analista de Inventarios concentra la mayor carga transversal del proceso, con 68 HH (42% del total), al intervenir en todas las actividades de la implementación.

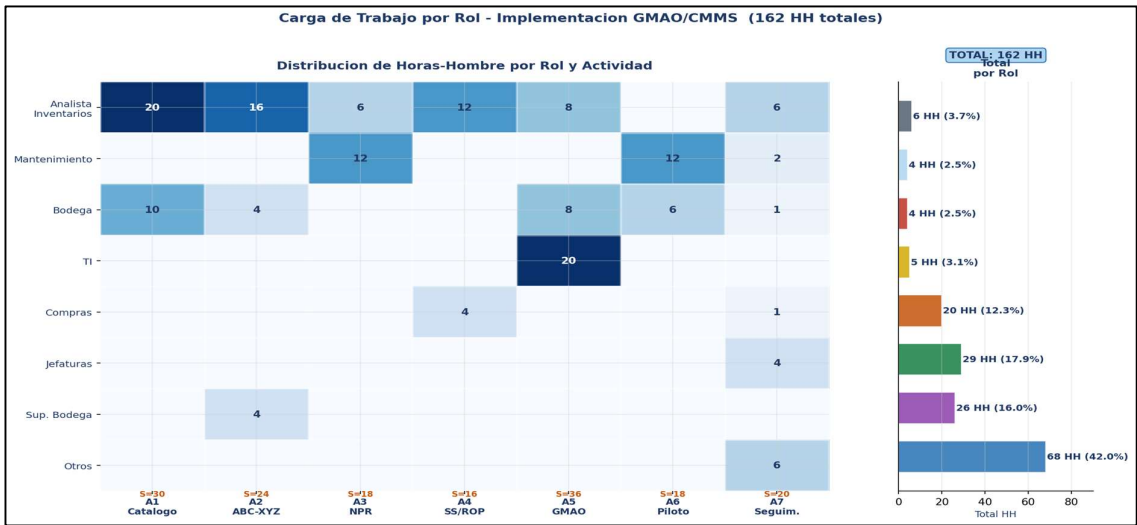


Figura 33 Distribución de Horas-Hombre por rol y actividad, Implementación GMAO/CMMS (162 HH totales). Elaborado por Duche, Carlos (2026).

El área de Bodega concentra su participación en las actividades A1 y A5, con 10 HH y 8 HH, respectivamente. Por su parte, el área de TI registra una intervención puntual, pero de alta intensidad, con 20 HH asignadas exclusivamente a la actividad crítica A5.

Esta estructura de asignación confirma que la implementación presenta una alta exigencia operativa en el ámbito de inventarios y una concentración técnica específica en TI durante la configuración del sistema. En consecuencia, la distribución de recursos es coherente con la secuencia de actividades y con la criticidad funcional de cada etapa.

Salida: Sistema automatizado con trazabilidad completa

La implementación del modelo TO-BE diseñado en esta fase produce mejoras cuantificables en los indicadores de desempeño del inventario MRO. La Tabla 38 consolida los resultados del primer mes posterior a la implementación y los compara con el promedio de los tres meses analizados en el diagnóstico AS-IS. Asimismo, incorpora una interpretación del impacto de cada indicador para facilitar la lectura de los resultados.

Tabla 38 *Resultados cuantificados del modelo TO-BE (mes 1 post implementación vs. diagnostico AS-IS).*

Indicador	AS-IS	TO-BE	Análisis del impacto
Nivel de Servicio (NS)	72,3%	94,8%	Incremento de 22,5 puntos porcentuales; el sistema atiende exitosamente 22,5 solicitudes adicionales por cada 100
Tasa de Quiebre (TQ)	27,7%	5,2%	Reducción del 81,2%; complemento directo del NS, la reducción refleja la eficacia de las alertas automáticas RF-06
Horas perdidas por faltantes	44,7 h/mes	7,8 h/mes	Reducción del 82,6%; el campo de demora por repuestos es obligatorio en el GMAO, con completitud del 100% frente al 60% previo
Trazabilidad OT-Inventario-Compras	34,2%	100%	Incremento de 65,8 puntos porcentuales; el GMAO impide cualquier despacho sin OT activa registrada en el sistema
Rotación de inventario	1.84 v/a	4,21 v/a	Incremento del 128,8%; resultado del ajuste de los niveles máximos según los parámetros SS/ROP calculados por ítem
Capital inmovilizado (promedio)	\$265.104	\$115.867	Reducción del 56,3% equivalente a \$149.237 liberados; el inventario

Indicador	AS-IS	TO-BE	Análisis del impacto
			promedio disminuye al ajustarse los máximos al modelo

Elaborador por: Duche, Carlos (2026).

La mejora más significativa, en términos absolutos, corresponde al nivel de servicio (NS), que pasa de 72,3% a 94,8%. Este incremento de 22,5 puntos porcentuales implica que el sistema TO-BE atiende exitosamente 22,5 solicitudes adicionales por cada 100, en comparación con la situación inicial. Este resultado valida la efectividad conjunta de la parametrización SS/ROP y del mecanismo de alertas automáticas RF-06.

La reducción del capital inmovilizado de \$265.104 a \$115.867 constituye otro resultado relevante. La disminución del 56,3%, equivalente a \$149.237 liberados, se explica por el ajuste de los niveles máximos de inventario a partir de parámetros calculados por ítem. De este modo, el modelo elimina la coexistencia de sobrestock y quiebres, característica del estado AS-IS.

La reducción de las horas perdidas por faltantes, de 44,7 h/mes a 7,8 h/mes, aporta la evidencia operativa más directa del impacto del sistema sobre la continuidad del mantenimiento preventivo. Este resultado se fortalece por la mejora en la calidad del registro, ya que el indicador alcanza 100% de completitud en el escenario TO-BE, frente al 60% observado en el esquema manual del estado AS-IS.

Fase 7 – Generación de indicadores en tiempo real

La Fase 7 cierra el ciclo metodológico de la propuesta de optimización de inventarios MRO al establecer un sistema de medición continua. Su función es verificar, en tiempo real, si los parámetros configurados en las fases anteriores producen el efecto esperado sobre el desempeño del inventario.

Sin un sistema operativo de indicadores, la implementación del modelo permanece incompleta. En ese escenario, los parámetros *SS* y *ROP* pueden degradarse ante variaciones de la demanda o del lead time sin ser detectados oportunamente, y la mejora del nivel de servicio no puede atribuirse con rigor a las intervenciones ejecutadas.

El diagnóstico AS-IS evidenció que HIDRO S.A. no disponía de una medición estructurada de los indicadores relevantes. El nivel de servicio se estimaba de forma subjetiva; la tasa de quiebre se registraba como observaciones cualitativas en las OT; la rotación de inventario no se calculaba periódicamente; y el capital inmovilizado no se valorizaba con una frecuencia definida.

Esta ausencia de medición constituye, al mismo tiempo, una causa y una consecuencia de la gestión reactiva. Sin indicadores, no es posible adoptar decisiones proactivas; y, sin decisiones proactivas, el sistema no genera mejoras sostenibles en su desempeño.

En este contexto, la Fase 7 tiene como finalidad transformar los datos capturados automáticamente por el GMAO/CMMS en información de gestión accionable. Para ello, se estructura un dashboard de control con periodicidad definida y con umbrales de alerta por indicador.

La Tabla 39 presenta los ocho indicadores que conforman el sistema de control operacional digital, junto con sus fórmulas de cálculo, la periodicidad de medición y la fuente mínima de datos requerida en el GMAO/CMMS. Esta definición formal permite asegurar comparabilidad entre períodos y consistencia analítica en la evaluación del modelo.

Tabla 39 *Indicadores del sistema de control operacional digital – formulas, periodicidad y fuente de datos.*

Indicador	Definición operativa	Formula de calculo	Período	Fuente mínima requerida
NS (Fill Rate)	% demanda atendida sin quiebre	$NS = \left(\frac{\sum Q_{desp}}{\sum Q_{sol}} \right) * 100$	Mensual	Kardex + registro OT (Q_{sol} y Q_{desp})
TQ (Stockout Rate)	% solicitudes no atendidas por falta de stock	$TQ = \left(\frac{N_{quiebres}}{N_{solicitudes}} \right) * 100$	Mensual	OT + registro de faltantes (Stockout=1)
Lead Time (LT)	Promedio del tiempo real solicitud → recepción	$LT = \left(\frac{1}{n} \right) \sum (t_{rec,k} - t_{sol,k})$	Mensual	Compras + Bodega (t_{sol} y t_{rec})
Rotación	Velocidad de consumo relativa al inventario promedio	$Rot = \frac{Consumo\ anual}{Inventario\ promedio}$	Trimestral	Kardex + valorización ($P_i \times Q_{stock}$)
Capital Inmovilizado (CI)	Valor monetario del stock existente en bodega	$CI = \sum (P_i \times Q_{stock,i})$	Mensual	Inventario valorizado (kardex GMAO)
Obsolescencia	Proporción del valor de inventario sin movimiento	$Obs = \frac{V_{sin\ mov}}{V_{total}} \times 100$	Trimestral	Kardex (fecha último movimiento)
Trazabilidad OT (TM)	% movimientos vinculados a OT con registro completo	$TM = \left(\frac{Movim.\ con\ registro\ completo}{Total} \right) * 100$	Mensual	GMAO: campo OT obligatorio en despacho

Indicador	Definición operativa	Formula de calculo	Período	Fuente mínima requerida
Horas perdidas (HP)	Tiempo improductivo acumulado por espera de repuestos	$HP = \sum (inicio\ real\ OT - inicio\ planificado\ OT)$	Mensual	OT: campo 'demora por repuestos' GMAO

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La interpretación de la Tabla 39 exige distinguir entre indicadores de resultado, de proceso, de calidad del sistema y de impacto operativo. Esta clasificación permite comprender la función analítica de cada métrica dentro del esquema de control.

El NS y la TQ son indicadores de resultado, ya que expresan directamente el nivel de disponibilidad del inventario. En cambio, el LT, la rotación y el capital inmovilizado son indicadores de proceso, porque permiten explicar las causas operativas del desempeño observado.

La obsolescencia y la trazabilidad actúan como indicadores de calidad del sistema de información. Su función es asegurar que la base de datos mantenga el nivel de consistencia necesario para sustentar el cálculo confiable de los demás indicadores.

Las horas perdidas constituyen el indicador de impacto operativo de mayor relevancia. Esta variable traduce el desempeño del inventario al lenguaje del mantenimiento, al cuantificar de forma directa la afectación sobre la continuidad de las órdenes de trabajo.

Actividad 1: Configuración del Dashboard de Control

La configuración del dashboard consiste en definir, para cada indicador de la Tabla 39, los umbrales que determinan el estado del semáforo operacional (verde, amarillo y rojo), la frecuencia de actualización automática y el responsable de su análisis. Esta configuración transforma el GMAO/CMMS de un sistema de registro en un sistema de alerta temprana. En consecuencia, el dashboard no solo describe lo ocurrido, sino que señala, en tiempo real, cuándo un indicador se aproxima o supera su umbral crítico.

Un componente central del diseño es la diferenciación de metas por segmento ABC–NPR. Establecer una única meta global de nivel de servicio para los 60 ítems del catálogo produciría una suboptimización en ambos extremos. Por una parte, impondría exigencias innecesarias a los ítems de baja criticidad; por otra, resultaría insuficiente para los ítems críticos.

La Tabla 40 consolida las metas diferenciadas de NS, TQ y rotación por segmento, así como el criterio de control asociado a cada uno. Esta estructura permite al sistema ajustar la

intensidad del control de acuerdo con el impacto económico y operacional del ítem. De este modo, la supervisión deja de ser uniforme y pasa a ser selectiva.

Tabla 40 Metas diferenciadas de NS, TQ y rotación por segmento ABC-NPR y criterio de control del dashboard.

Segmento	NS meta	TQ max.	Rotación min.	KPI prioritario	Criterio de control
A-Alta (9 ítems)	98%	$\leq 2\%$	≥ 4 v/a	NS 98%	Control diario; alerta inmediata al cruzar ROP; proveedor alternativo identificado
A-Media (3 ítems)	95%	$\leq 5\%$	≥ 4 v/a	NS 95%	Revisión continua (R, Q); SS calculado con $z=1.645$
A-Baja (3 ítems)	90%	$\leq 10\%$	≥ 4 v/a	NS 90%	Política continua; menor SS por baja criticidad NPR
B-Alta (7 ítems)	95%	$\leq 5\%$	≥ 2 v/a	NS 95%	Revisión periódica T=15d; SS ajustado por LT variable
B-Media (6 ítems)	90%	$\leq 10\%$	≥ 2 v/a	NS 90%	Revisión periódica T=30d; parámetros recalculados trimestralmente
B-Baja (11 ítems)	85%	$\leq 15\%$	≥ 2 v/a	NS 85%	Revisión periódica T=30d; tolerancia a quiebre ocasional
C-Alta (1 ítem)	90%	$\leq 10\%$	≥ 1 v/a	NS 90%	Control simplificado; nivel fijo de reposición
C-Media (6 ítems)	85%	$\leq 15\%$	≥ 1 v/a	NS 85%	Revisión mensual; pedido hasta nivel máximo S
C-Baja (14 ítems)	85%	$\leq 15\%$	≥ 1 v/a	NS 85%	Revisión mensual; mínimo control; tolerancia alta a quiebre

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La Tabla 40 refleja la lógica de asignación de recursos proporcional al riesgo operacional que sustenta el modelo. Los 9 ítems del segmento A-Alta reciben el control más riguroso, mientras que los 14 ítems del segmento C-Baja operan con una tolerancia mayor al quiebre. Esta diferenciación permite concentrar la atención analítica en los ítems cuyo desabastecimiento genera mayor impacto.

La Figura 34 presenta el dashboard consolidado del primer mes de operación del escenario TO-BE. El panel se organiza en seis tarjetas de KPI que muestran, para cada indicador, el valor actual, el valor de referencia AS-IS, la meta configurada y la mejora absoluta alcanzada. Este tablero constituye la interfaz principal del sistema de control operacional y el instrumento de revisión mensual del Analista de Inventarios.

Figura 34 Dashboard de Indicadores en Tiempo Real – Mes 1 TO-BE. Los seis KPIs principales muestran valor actual, referencia AS-IS, meta configurada y mejora absoluta respecto al diagnóstico.

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Actividad 2: Nivel de Servicio y Tasa de Quiebre

El Nivel de Servicio (NS) y la Tasa de Quiebre (TQ) constituyen los indicadores de resultado más directamente vinculados con el objetivo operativo del modelo: asegurar la disponibilidad de repuestos en el punto de consumo. Aunque ambos mantienen una relación inversa, su interpretación no es idéntica. El NS expresa el grado de atención efectiva al cliente interno, mientras que la TQ mide la frecuencia con la que el sistema falla en satisfacer una solicitud por insuficiencia de stock.

La Figura 35 presenta la evolución mensual de ambos indicadores durante los tres meses del diagnóstico AS-IS y el primer mes de operación TO-BE. Los resultados evidencian dos efectos simultáneos. En primer lugar, el NS aumenta desde un promedio de 72,3% hasta 94,8%, lo que representa un incremento de 22,5 puntos porcentuales y una mejora relativa de 31,1%.

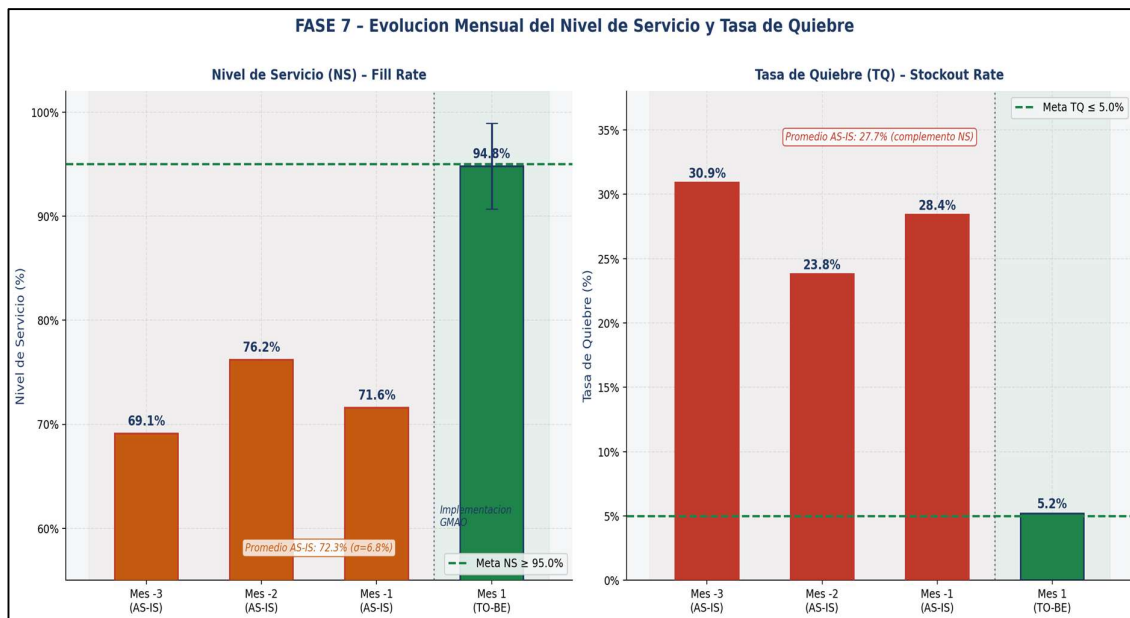


Figura 35 Evolución mensual del Nivel de Servicio (NS) y la Tasa de Quiebre (TQ).

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

En segundo lugar, se observa una reducción relevante de la variabilidad del indicador. La desviación estándar del NS disminuye de 6,8% a 2,1%, lo que indica que el sistema TO-BE no solo mejora el promedio de atención, sino también la consistencia del abastecimiento frente a la demanda operativa.

La reducción de la variabilidad del NS tiene implicaciones directas sobre el dimensionamiento del stock de seguridad. En el modelo probabilístico, este parámetro se calcula como $SS = z \cdot \sigma_d \cdot \sqrt{LT}$, donde σ_d representa la desviación estándar de la demanda. Si

la variabilidad operativa disminuye de forma sostenida, futuras recalibraciones podrían reducir selectivamente el *SS* sin comprometer el nivel de servicio objetivo.

En cuanto a la Tasa de Quiebre, su reducción de 27,7% a 5,2% equivale a una mejora de 81,2%. Este resultado confirma la mitigación de la principal causa estructural identificada en el diagnóstico: la ausencia de alertas automáticas de reposición. En el escenario AS-IS, el quiebre se detectaba cuando el técnico solicitaba el repuesto en bodega y este ya no estaba disponible.

En el escenario TO-BE, en cambio, el GMAO/CMMS genera automáticamente la solicitud de reposición cuando Q_{stock} cruza el umbral *ROP*. De esta manera, el proceso de compra se activa antes del agotamiento del inventario, desplazando la lógica de reposición desde una respuesta reactiva hacia un control preventivo.

La Figura 36 desagrega el NS por segmento ABC–NPR y permite verificar el cumplimiento de las metas diferenciadas definidas en la Tabla 40. Los segmentos de prioridad alta registran valores TO-BE de 97,2%, 95,4% y 91,8%, frente a metas de 98%, 95% y 90%, respectivamente. En este contexto, el segmento A-Alta constituye el único caso con una brecha negativa de 0,8 puntos porcentuales respecto de su meta.

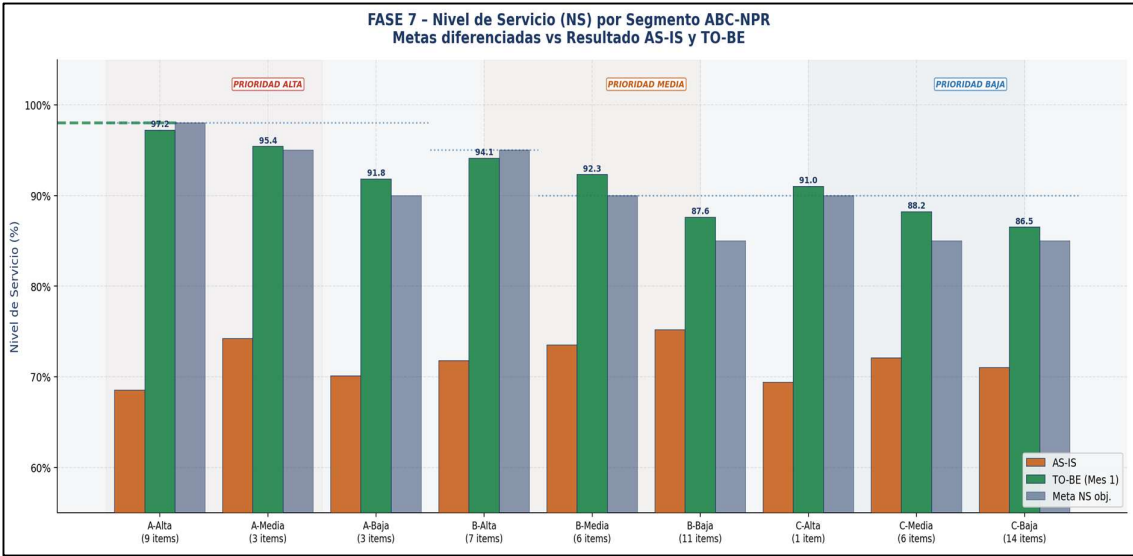


Figura 36 Nivel de Servicio (NS) por segmento ABC–NPR: comparación AS-IS, TO-BE (Mes 1) y meta diferenciada por prioridad.
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Desde la lógica del semáforo de control, esta desviación ubica al segmento A-Alta en condición de alerta amarilla. En términos operativos, ello no invalida el modelo, pero sí señala

la necesidad de revisar el SS de los ítems involucrados en la siguiente actualización trimestral de parámetros.

Actividad 3: Rotación de Inventario y Capital Inmovilizado

La rotación de inventario y el capital inmovilizado son indicadores de eficiencia económica del sistema. Ambos permiten evaluar si el inventario está dimensionado en función del consumo real o si existe sobreinversión en existencias que inmoviliza capital sin incrementar la disponibilidad operativa.

En el modelo AS-IS, la ausencia de niveles máximos definidos por ítem generaba sobrestock crónico en los componentes de mayor valor unitario, como el turbo, la ECU y los inyectores. Al mismo tiempo, los filtros de alta rotación presentaban quiebres recurrentes. Esta coexistencia de sobrestock y desabastecimiento es característica de sistemas sin diferenciación por prioridad ni parametrización cuantitativa.

La Figura 37 analiza esta dualidad mediante dos paneles complementarios. El panel izquierdo presenta la rotación por clase ABC en el estado AS-IS y en el primer mes del escenario TO-BE, junto con las metas diferenciadas del modelo. El panel derecho muestra la evolución temporal del capital inmovilizado desde los tres meses del diagnóstico hasta la proyección de nueve meses de operación TO-BE.

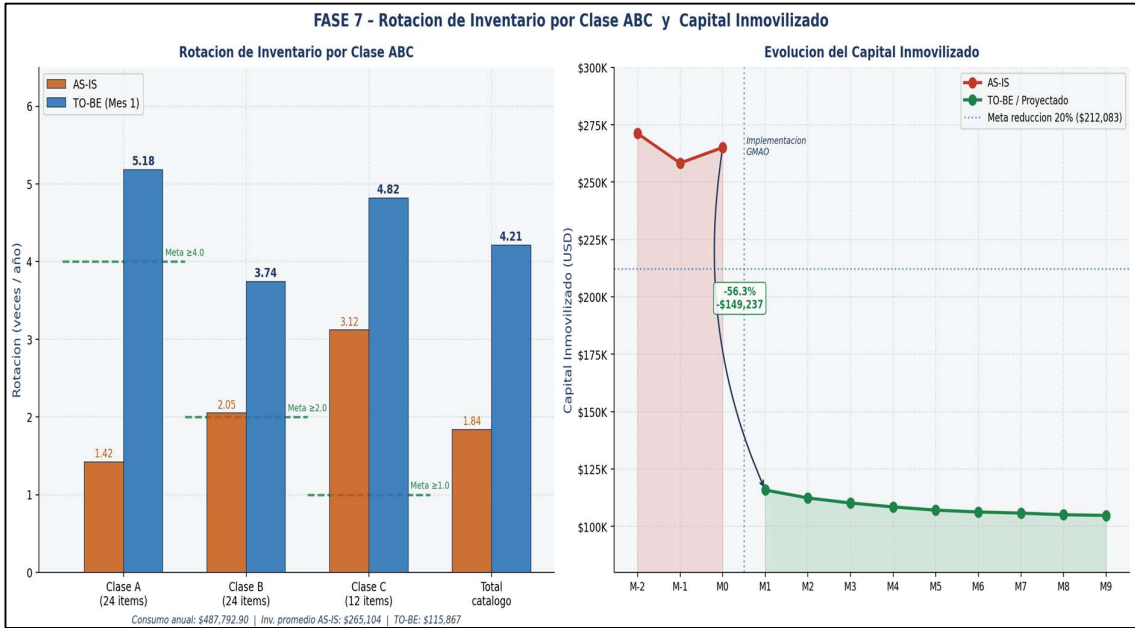


Figura 37 Rotación de inventario por clase ABC (izquierda) y evolución del capital inmovilizado en USD (derecha).
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

La mejora en la rotación resulta particularmente significativa en la Clase A, donde el indicador pasa de 1,42 a 5,18 v/a, lo que representa un incremento de 265%. Este resultado es especialmente relevante, porque se trata del segmento donde el costo de oportunidad del sobre inventario y el impacto del quiebre son más elevados.

La mejora observada en la Clase C, de 3,12 a 4,82 v/a, también es consistente con la lógica del modelo. Aunque podría suponerse que los ítems de menor criticidad ya presentarían alta rotación por su bajo valor unitario, en el escenario AS-IS estos componentes mantenían niveles de resguardo discrecionales. La implementación del modelo sustituye ese criterio empírico por el nivel máximo calculado $Max = ROP + Q$.

En términos de capital inmovilizado, la reducción de 265.104 USD a 115.867 USD equivale a una disminución del 56,3%, es decir, a 149.237 USD liberados. Este resultado supera la meta inicial de reducción planteada en el diseño del modelo y evidencia que el sobre inventario del escenario AS-IS era mayor de lo que sugerían los registros parciales.

La valorización integral del inventario, realizada a través del Kardex del GMAO/CMMS, permitió identificar ítems con niveles históricos muy superiores a los parámetros calculados por el modelo. En consecuencia, la reducción obtenida no responde a una subestimación conservadora del diseño, sino a la corrección de una estructura de inventario previamente sobredimensionada.

El panel derecho de la Figura 37 resulta especialmente relevante por la forma de la curva de estabilización del escenario TO-BE. La caída abrupta observada en el primer mes refleja el ajuste inmediato de los niveles máximos al aplicar los parámetros del modelo. Posteriormente, la pendiente decreciente más suave evidencia la convergencia progresiva hacia un inventario promedio estable.

Esta trayectoria indica que, en los ciclos sucesivos de reposición, el sistema consume gradualmente el excedente residual hasta estabilizarse en un nivel óptimo de largo plazo. Con base en la proyección M2–M9, dicho nivel se ubica en un intervalo cercano a 104.800–105.000 USD, coherente con la política de reposición parametrizada por ítem.

Actividad 4: Lead Time de Reposición y Obsolescencia

El lead time de reposición (LT) y la obsolescencia son dos indicadores que no existían, en forma medible, en el sistema AS-IS. El LT se estimaba de manera informal para proveedores importados y nacionales, pero sin un registro estructurado que permitiera calcular su variabilidad o identificar desviaciones por proveedor.

La obsolescencia tampoco se reconocía como un indicador formal de control. Aunque el diagnóstico documentó la existencia de ítems sin movimiento durante los últimos 12 meses, no se disponía de una cuantificación de su valor ni de un criterio operativo para su gestión.

La Figura 38 analiza ambos indicadores mediante dos paneles complementarios. El panel izquierdo compara el LT por proveedor entre el escenario AS-IS estimado, el primer mes del escenario TO-BE y la meta del modelo, definida en 45 días o menos para proveedores importados.

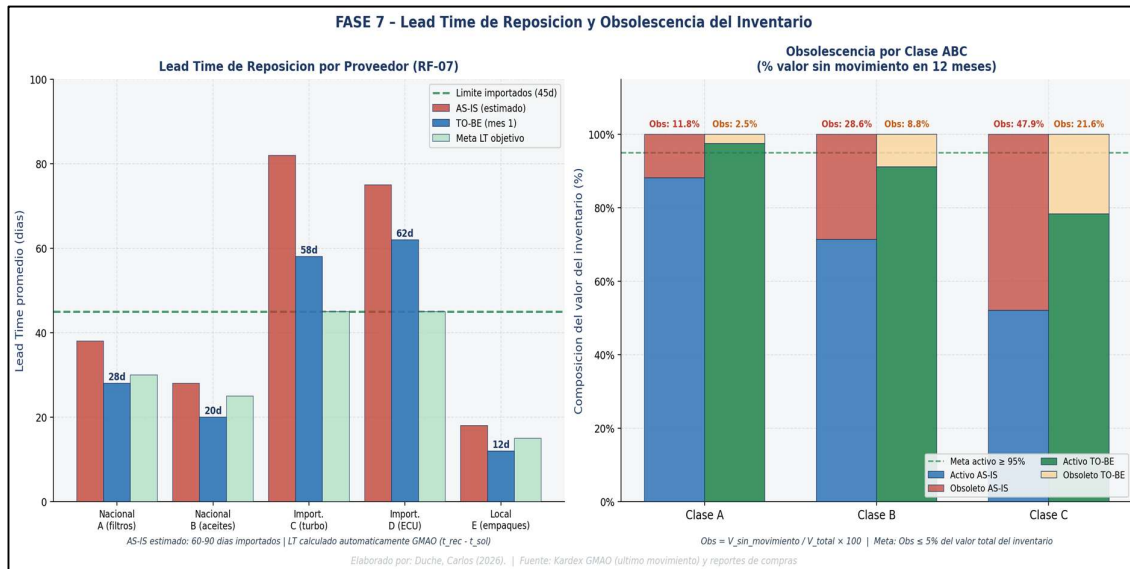


Figura 38 Lead Time de reposición por proveedor (AS-IS estimado, TO-BE Mes 1 y meta) e índice de obsolescencia por clase ABC (composición activo/obsoleto en el AS-IS y TO-BE). Elaborado por Duche, Carlos (2026).

La primera conclusión es que la medición sistemática del LT genera una mejora inmediata en la capacidad de control. Al registrar t_{sol} y t_{rec} en cada orden de compra, el GMAO/CMMS permite identificar proveedores con tiempos de reposición superiores al umbral establecido, lo que habilita acciones correctivas específicas por parte del área de Compras.

En el caso analizado, dos proveedores importados (C-Turbo y D-ECU) registran LT de 58 y 62 días, respectivamente, por encima de la meta de 45 días. En el escenario AS-IS, esta desviación permanecía oculta, debido a que el LT no se calculaba de forma diferenciada por proveedor.

El panel derecho de la Figura 38 muestra la composición del inventario en condición activa y obsoleta, por clase ABC, comparando los escenarios AS-IS y TO-BE. El hallazgo más relevante corresponde a la Clase C, cuya obsolescencia en el estado inicial alcanza 47,9% del valor sin movimiento.

Este resultado es coherente con el diagnóstico, ya que los ítems de baja rotación y baja criticidad habían acumulado sobre stock discrecional, en varios casos superior a varios años de consumo. La implementación del modelo reduce este porcentaje a 21,6% en el primer mes, como efecto de la aplicación de máximos calculados por ítem.

No obstante, esta reducción no puede interpretarse como un ajuste instantáneo del inventario existente. El stock obsoleto acumulado en el escenario AS-IS no desaparece por efecto automático de la implementación, sino que requiere procesos específicos de liquidación, depuración o reclasificación, ahora facilitados por la trazabilidad del GMAO/CMMS.

En la Clase A, la obsolescencia disminuye de 11,8% a 2,5%, lo que confirma que el sobre inventario en ítems críticos también era relevante en el escenario inicial. Este comportamiento evidencia que, incluso en componentes de alto valor y alta criticidad, coexistían quiebres recurrentes y excedentes de inventario.

La presencia simultánea de desabastecimiento y sobre inventario dentro de una misma clase constituye una manifestación operativa de la gestión sin parámetros diferenciados. En este sentido, la mejora observada valida el efecto del modelo sobre dos dimensiones complementarias: la disponibilidad y la depuración del exceso estructural de inventario.

Actividad 5: Horas Perdidas por Faltantes y Semáforo de Control

El indicador de horas perdidas por faltantes vincula el desempeño del sistema de inventarios con su impacto operativo sobre la continuidad del mantenimiento preventivo. Su cálculo requiere disciplina de registro, ya que cada OT afectada por la ausencia de un repuesto debe documentar la causa de la demora y el tiempo de espera asociado.

En el escenario AS-IS, este registro existía en formato físico, pero presentaba una completitud aproximada del 60%, lo que implicaba una subestimación del impacto real. En el escenario TO-BE, el campo correspondiente es obligatorio en el GMAO/CMMS para el cierre de una OT con demora, lo que eleva la completitud del registro al 100%.

La Figura 39 muestra la evolución mensual de este indicador. La comparación entre los tres meses del diagnóstico AS-IS (52.1, 38.4, 43,6 h/mes) y el primer mes del escenario TO-BE (7,8 h/mes) evidencia una reducción de 82,6%, equivalente a 36,9 horas mensuales recuperadas para la ejecución del mantenimiento preventivo.

Este resultado supera la meta de reducción de 80% definida en el modelo. Además, el panel derecho de la Figura 39 presenta el semáforo de control correspondiente a los siete indicadores monitoreados en el corte mensual, con el fin de sintetizar el estado operativo del sistema en el primer mes de implementación.

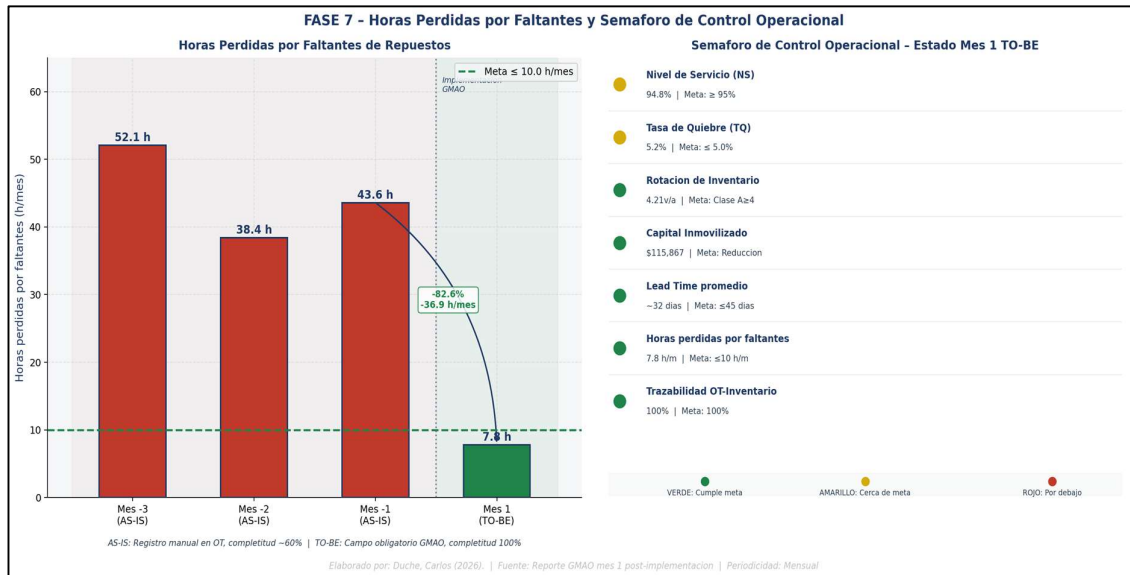


Figura 39 Horas perdidas por faltantes de repuestos (AS-IS vs TO-BE, izquierda) y semáforo de control operacional del sistema GMAO/CMMS para los siete indicadores del Mes 1 TO-BE (derecha).

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

El semáforo de la Figura 39 muestra que cinco de los siete indicadores se ubican en condición verde: rotación, capital inmovilizado, lead time, horas perdidas y trazabilidad OT. Por su parte, el nivel de servicio (NS) y la tasa de quiebre (TQ) se sitúan en condición amarilla, por proximidad a sus metas de control.

La Tabla 41 desarrolla el detalle de este semáforo, incorporando los umbrales de evaluación y el diagnóstico asociado a cada indicador. Esta tabla permite interpretar el estado del sistema no solo en términos de cumplimiento, sino también en función del margen existente respecto de cada meta operativa.

Tabla 41 Semáforo de control operacional del sistema GMAO/CMMS – estado del Mes 1 TO-BE con umbrales y diagnóstico.

Indicador	Valor Mes 1	VERDE (cumple)	AMARILLO (cerca)	ROJO (crítico)	Estado y diagnostico
Nivel de Servicio (NS)	94,8%	≥95%	≥90%	<90%	AMARILLO – 0.2 pp por debajo de la meta; tendencia positiva confirmada
Tasa de Quiebre (TQ)	5,2%	≤5%	5-10%	>10%	AMARILLO – 0.2 pp sobre el límite; complemento directo del NS
Rotación de inventario	4,21 v/a	≥4 v/a	3-4 v/a	<3 v/a	VERDE – supera la meta Clase A (≥4 v/a) en el primer mes
Capital inmovilizado	\$115.867	≤\$150K	\$150-200K	>\$200K	VERDE – supera ampliamente la meta de reducción planteada

Indicador	Valor Mes 1	VERDE (cumple)	AMARILLO (cerca)	ROJO (crítico)	Estado y diagnóstico
Lead time promedio	~32 días	≤45 días	45-60 días	>60d	VERDE – primer LT medido sistemáticamente; por debajo del límite importados
Horas perdidas/mes	7,8 h/mes	≤10 h/mes	10-20 h/mes	>20 h/mes	VERDE – cumple la meta con margen de 2.2 horas
Trazabilidad OT	100%	100%	90-99%	<90%	VERDE – cumplimiento estructural por diseño del flujo GMAO

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

El hecho de que el NS (94,8%) y la TQ (5,2%) se ubiquen en condición amarilla durante el primer mes no constituye una señal de alarma, sino una indicación de ajuste fino. En ambos casos, la distancia respecto de la meta es de apenas 0,2 puntos porcentuales, lo que confirma proximidad al umbral de cumplimiento.

La tendencia observada resulta favorable: la desviación estándar del NS se reduce de 6,8 % a 2,1 %, lo que indica una mejora en la consistencia del sistema. En este contexto, el diagnóstico de la Tabla 41 sugiere seguimiento y ajuste paramétrico, más que una intervención correctiva estructural.

La acción más probable en la próxima revisión trimestral consiste en recalibrar el stock de seguridad de los ítems del segmento A-Alta que aún presentan quiebres ocasionales. Esta verificación puede realizarse de forma directa mediante el reporte del GMAO/CMMS asociado a las OT con demora por faltante, identificando los casos a nivel de ítem.

Actividad 6: Resultados consolidados del sistema de control operacional digital

La Tabla 42 consolida la comparación integral entre los escenarios AS-IS y TO-BE para los indicadores del sistema de control. Esta síntesis constituye la evidencia empírica central de la propuesta, ya que muestra mejoras cuantificables y consistentes en las dimensiones críticas del desempeño del inventario MRO.

Tabla 42 *Comparativo de evaluación: indicadores de desempeño AS-IS vs TO-BE, Mes 1 post implementación.*

Indicador	AS-IS	TO-BE Mes 1	Δ Mejora	Análisis del resultado
Nivel de Servicio (NS)	72,3% (σ=6,8%)	94,8% (σ=2,1%)	+22,5 pp	Incremento de 31,1% relativo. La reducción de la variabilidad (σ de 6,8% a 2,1%) confirma que el sistema TO-BE no solo

Indicador	AS-IS	TO-BE Mes 1	Δ Mejora	Análisis del resultado
				mejora el promedio sino la consistencia del servicio.
Tasa de Quiebre (TQ)	27,7%	5,2%	-22,5 pp	Reducción del 81,2%. TQ es el complemento directo del NS por definición; su reducción refleja la eficacia de las alertas automáticas RF-06 configuradas en la Fase 6.
Rotación de inventario	1.84 v/a	4,21 v/a	+2.37 v/a	Incremento del 128,8%. Resultado del ajuste de los niveles máximos según parámetros SS/ROP calculados; el mismo consumo anual (\$487,792.90) rota sobre un inventario promedio 56,3% menor.
Capital inmovilizado	\$265,104	\$115,867	-\$149,237	Reducción del 56,3%. Supera la meta de reducción del 15-20% planteada en el diseño. Los \$149,237 liberados representan capital productivo disponible para otras necesidades operativas.
Lead time promedio	Est. 60-90 d (importados)	~32 d (prom.)	< meta 45d	Primer registro sistemático del LT real via RF-07. El GMAO calcula $LT = t_{rec} - t_{sol}$ en cada OC, eliminando la estimación subjetiva del AS-IS ('60-90 días según reportes').
Horas perdidas/mes	44,7 h/mes (rango 38-52)	7,8 h/mes	-36,9 h/mes	Reducción del 82,6%. El campo 'demora por repuestos' en el GMAO tiene completitud del 100% (vs 60% del registro manual AS-IS), lo que además mejora la calidad del dato.
Trazabilidad OT-Inventario	34,2%	100%	+65.8 pp	Incremento del 192,4%. El 100% no es una meta aspiracional sino un resultado estructural: el GMAO bloquea el despacho sin OT activa, haciendo imposible que existan movimientos no trazados.

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La lectura integrada de la Tabla 42 permite identificar tres patrones principales. El primero es la consistencia de la mejora, ya que todos los indicadores evolucionan en la dirección esperada. Esto descarta que una mejora específica se haya obtenido a costa del deterioro de otra variable relevante.

El segundo patrón corresponde a la magnitud diferenciada del cambio. Los indicadores más deteriorados en el escenario AS-IS, como la trazabilidad y el capital inmovilizado, presentan los cambios relativos más pronunciados. Este comportamiento confirma que el modelo interviene sobre las causas raíz identificadas en el diagnóstico.

El tercer patrón es la reducción de la variabilidad operativa. La disminución de la desviación estándar del NS, de 6,8% a 2,1%, indica que el sistema TO-BE no solo mejora el nivel medio de desempeño, sino también su estabilidad en el tiempo.

Desde el punto de vista metodológico, la comparabilidad entre los escenarios AS-IS y TO-BE constituye un aspecto central de la validación. Los valores del escenario inicial provienen de tres meses de observación previos a la implementación, bajo las mismas condiciones operativas generales, mientras que los valores del escenario TO-BE corresponden al primer mes de operación con el nuevo sistema.

Esta comparación pre-post permite atribuir, con un nivel razonable de confianza, las mejoras observadas a la ejecución del modelo propuesto y no a variaciones externas de carácter estacional u operativo.

CAPÍTULO III

PROPUESTA Y RESULTADOS ESPERADOS

La propuesta de optimización del inventario MRO del taller de equipo pesado de HIDRO S.A. constituye un sistema que transforma la gestión reactiva actual en un modelo preventivo basado en datos, en la criticidad y en el soporte tecnológico. Esta transformación se articula mediante tres pilares fundamentales que operan de manera sinérgica para asegurar la disponibilidad de repuestos críticos y minimizar los quiebres de stock que actualmente afectan a la ejecución del mantenimiento preventivo.

El primer pilar consiste en la segmentación inteligente del catálogo mediante la aplicación combinada de tres metodologías complementarias: (i) la clasificación ABC, que jerarquiza los repuestos por su valor económico anual de consumo, identificando aquellos que representan el 78,72% del valor total del inventario; (ii) la clasificación XYZ, que caracteriza los patrones de demanda según su variabilidad e intermitencia, diferenciando consumibles predecibles de componentes con demanda esporádica; y (iii) la priorización por criticidad mediante el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), derivado del análisis AMEF, que cuantifica el riesgo operacional asociado a la falta de cada componente, considerando la severidad, la ocurrencia y la detectabilidad. Esta segmentación tridimensional genera una matriz estratégica de 9 segmentos (ABC-NPR) que permite asignar políticas diferenciadas de control, evitando tanto la sobreinversión en componentes de bajo riesgo como la subinversión en repuestos críticos de valor moderado.

El segundo pilar establece un modelo cuantitativo de reposición fundamentado en la demanda histórica, la variabilidad documentada y los tiempos reales de entrega (lead time). Para los 16 ítems del segmento A-Alta (o A-Alto), que concentran el 55,42% del valor y presentan criticidad operacional máxima, se aplica un modelo probabilístico/estocástico que calcula el stock de seguridad óptimo mediante distribuciones empíricas ajustadas, garantizando niveles de servicio diferenciados según la prioridad: 98% para Alta, 95% para Media+A, 90% para Media+B/C y 85% para Baja+B/C. Para los segmentos de menor criticidad, se simplifican los controles mediante políticas de revisión periódica con nivel objetivo. Este dimensionamiento parametrizado sustituye las decisiones subjetivas por reglas explícitas que balancean el costo del inventario con el riesgo de quiebre.

El tercer pilar integra el flujo operativo entre el mantenimiento, la bodega y las compras mediante la implementación de un sistema GMAO/CMMS (Gestión de Mantenimiento Asistido por Computador / Computerized Maintenance Management System) que habilita la

trazabilidad completa de cada transacción. Este sistema vincula cada consumo de repuestos a una orden de trabajo específica, a un equipo identificado y a un ítem codificado, eliminando la dependencia de registros manuales y notas descriptivas. Las alertas automáticas configuradas sobre los puntos de reorden (PR/ROP) disparan solicitudes preventivas de compra cuando el stock disponible alcanza el umbral crítico, transformando el ciclo de reposición de reactivo a proactivo. Adicionalmente, el sistema genera indicadores de desempeño en tiempo real (nivel de servicio, tasa de quiebre, rotación, capital inmovilizado y obsolescencia), lo que permite el control continuo y la mejora iterativa del modelo.

La implementación de estos tres pilares se estructura como una secuencia de actividades interdependientes que se inicia con la depuración y normalización del catálogo MRO (eliminando duplicidades y estandarizando códigos), continúa con los cálculos de clasificación y parametrización, avanza hacia la configuración tecnológica del sistema GMAO/CMMS y culmina con la capacitación del personal y el seguimiento de indicadores. El cronograma previsto contempla 8 semanas de implementación con una carga total de 162 horas-hombre distribuidas estratégicamente para asegurar validaciones progresivas en cada etapa crítica. La secuencia lógica de actividades garantiza que cada salida sea verificable y constituya una entrada validada para la siguiente fase, minimizando el retrabajo y asegurando la trazabilidad de las decisiones.

La validez de los resultados depende del cumplimiento de los supuestos del modelo. La Tabla 43 explicita cada supuesto, su impacto potencial y la acción de mitigación prevista.

Tabla 43 *Supuestos del modelo, impacto y mitigación.*

No.	Supuesto	Impacto si no se cumple	Mitigación
1	Base histórica de 12 meses representativa de la demanda futura.	SS/ROP pierden precisión; quiebres o sobreinventario.	Recalibración trimestral con ventana móvil.
2	Lead times dentro del rango histórico (30–90 días import.; 5–20 nacional).	SS insuficiente o capital ocioso.	Monitoreo mensual de LT real vs. esperado.
3	Registro completo de movimientos en GMAO/CMMS.	Trazabilidad e indicadores degradados.	Campo OT obligatorio; auditorías mensuales.
4	Costos unitarios vigentes (2025); tasa oportunidad = 8 %.	Evaluación económica pierde validez.	Actualización semestral de costos.
5	Criticidad NPR refleja riesgo operacional real.	NS desalineados; sub/sobrepotección.	Revisión semestral ante cambios de flota o MP.

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Con el fin de visualizar la arquitectura completa del sistema propuesto, la Figura 40 presenta el diagrama de red de implementación, el cual esquematiza el conjunto de actividades, sus interdependencias lógicas, los hitos de validación críticos y los ciclos de retroalimentación

que habilitan el ajuste continuo del modelo. Este diagrama constituye la hoja de ruta operativa para la ejecución del proyecto, explicitando responsables, entradas requeridas y salidas esperadas en cada nodo de decisión.

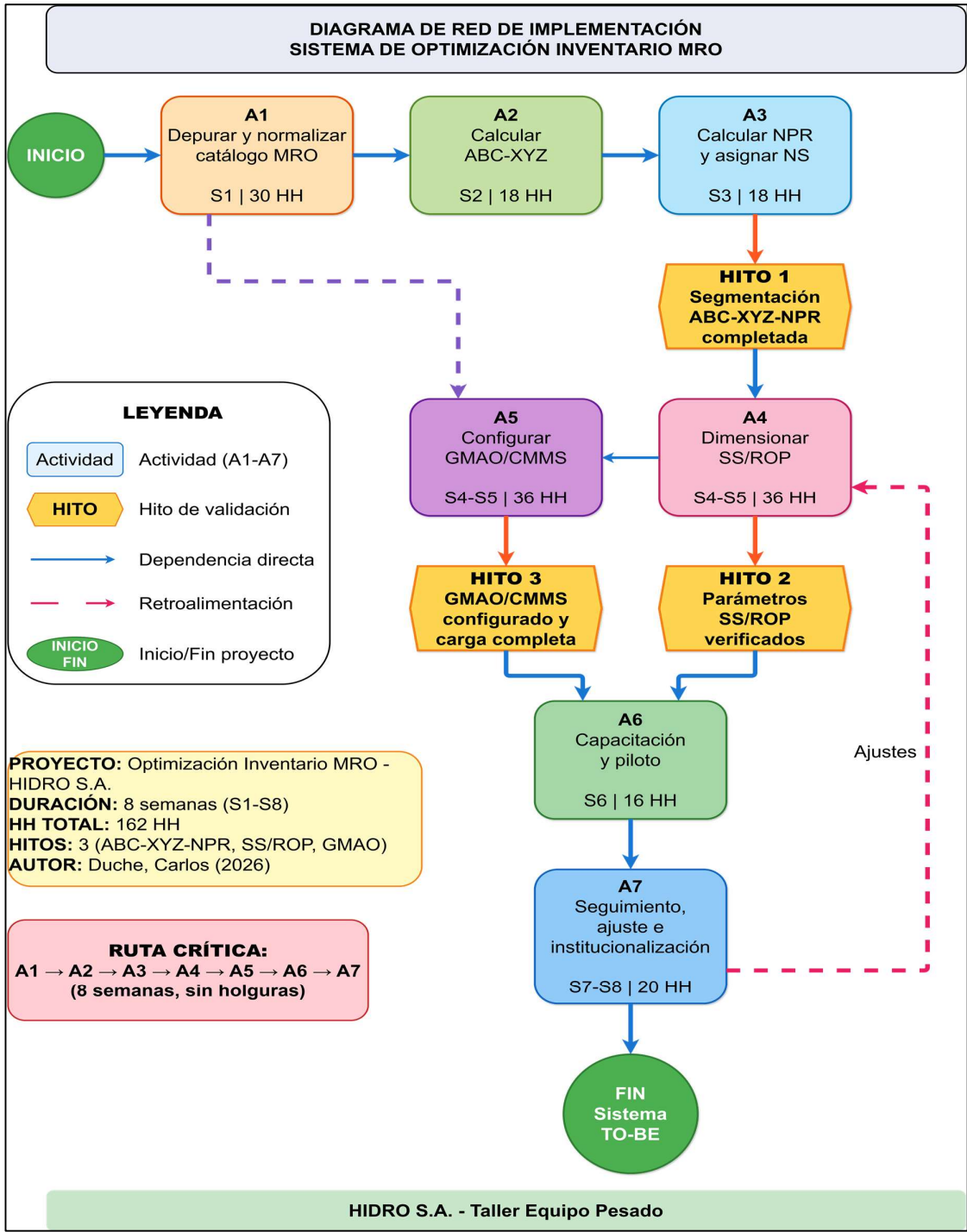


Figura 40 Diagrama de red de implementación de la propuesta.

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

El diagrama identifica tres hitos críticos que operan como puntos de validación obligatoria: (1) la finalización de la matriz ABC-XYZ-NPR, que consolida la segmentación estratégica; (2) el cálculo verificado de los parámetros SS/ROP para todos los ítems de clase A, que asegura el dimensionamiento técnico; y (3) la configuración funcional del sistema GMAO/CMMS con la carga inicial del catálogo y de los parámetros, que habilita el control automatizado. Cada hito requiere una aprobación formal antes de avanzar a la siguiente fase, garantizando que no se acumulen errores de especificación que comprometan etapas posteriores.

La Tabla 44 consolida los entregables tangibles de la propuesta, especificando el contenido, el formato de entrega y la utilidad operativa de cada producto. Estos entregables no constituyen documentos descriptivos, sino que son herramientas operacionales directamente aplicables al control del inventario MRO.

Tabla 44 *Entregables tangibles de la propuesta de optimización.*

Entregable	Descripción aplicada a HIDRO S.A.	Formato	Uso operacional	Responsable actualización
Matriz ABC-XYZ-NPR	Segmentación del catálogo MRO por valor económico, variabilidad de demanda y criticidad operacional. Incluye 60 ítems clasificados en 9 segmentos estratégicos.	Excel / CSV Integrado en GMAO	Asignación de políticas diferenciadas por segmento. Priorización de recursos de control.	Analista de Inventarios (actualización trimestral)
Parámetros SS/ROP por ítem	Stock de seguridad, punto de reorden y niveles máximos calculados para cada ítem según demanda histórica, variabilidad y lead time. 24 ítems Clase A con modelación estocástica completa.	Tabla paramétrica en GMAO/CMMS	Disparo automático de alertas de reposición. Dimensionamiento de pedidos. Control de máximos.	Analista de Inventarios + Compras (revisión mensual)
Matriz de criticidad NPR	Evaluación AMEF de cada repuesto: Severidad (S), Ocurrencia (O), Detectabilidad (D) y NPR resultante. Incluye justificación técnica de cada puntuación.	Excel + Documento metodológico	Priorización de inversiones en inventario. Definición de niveles de servicio objetivo. Revisión de criticidad ante cambios.	Mantenimiento + Analista (actualización semestral)

Entregable	Descripción aplicada a HIDRO S.A.	Formato	Uso operacional	Responsable actualización
Reglas de reposición por segmento	Política específica para cada segmento ABC-XYZ-NPR: tipo de revisión (continua/periódica), frecuencia, nivel de servicio, disparadores y responsables.	Procedimiento operativo (PDF)	Guía de decisión para Bodega y Compras. Estandarización de criterios de reposición.	Analista de Inventarios (revisión anual)
Configuración GMAO/CMMS	Catálogo codificado con equivalencias (parte original/alterna), estructura de kardex, alertas SS/ROP configuradas, flujo OT-consumo-inventario y tablero de indicadores.	Sistema implementado + Manual de usuario	Registro y control operativo diario. Trazabilidad completa. Generación automática de indicadores.	TI + Analista (mantenimiento continuo)
Tablero de indicadores de control	Panel con 5 KPIs: Nivel de Servicio (NS), Tasa de Quiebre (TQ), Rotación, Capital Inmovilizado (CI) y Obsolescencia. Medición mensual con tendencias y alertas.	Dashboard GMAO + Reporte Excel mensual	Monitoreo del desempeño del inventario. Detección temprana de desviaciones. Evaluación de mejora.	Analista de Inventarios (actualización mensual)
Procedimiento de ajuste de parámetros	Metodología para recalcular SS/ROP ante cambios: nueva demanda histórica, modificación lead time, cambio de criticidad. Incluye fórmulas y criterios de decisión.	Documento técnico (PDF)	Mantenimiento de vigencia de parámetros. Respuesta ágil a cambios operacionales.	Analista de Inventarios (aplicación según necesidad)

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La entrega de estos productos asegura la transferencia completa del conocimiento técnico generado durante el diseño, evitando la dependencia de personas específicas y habilitando la continuidad operativa del sistema de gestión más allá de la fase de implementación inicial. Cada entregable incluye su respectiva documentación metodológica, lo que permite validar los cálculos, replicar los procedimientos y ajustar parámetros de manera fundamentada ante cambios en las condiciones operativas.

Resultados esperados

Los resultados esperados se estructuran como metas cuantificables de desempeño del inventario MRO, vinculadas directamente a los indicadores de control definidos en el diseño

del sistema y alineadas con el objetivo central de asegurar la disponibilidad oportuna de repuestos críticos para el mantenimiento preventivo. A diferencia del desempeño actual, caracterizado por quiebres recurrentes (documentados en 5 de 8 reportes revisados, con una incidencia del 62,5%), por reprogramaciones de mantenimiento por falta de filtros y aceites, y por extensiones de intervención de hasta 8 horas por indisponibilidad de componentes, el sistema propuesto establece niveles de servicio diferenciados por criticidad que equilibran el riesgo operacional con la eficiencia del capital invertido.

La definición de resultados esperados reconoce que no todos los ítems requieren el mismo nivel de disponibilidad: un componente del sistema hidráulico principal cuya falla genera un paro total inmediato (severidad S=5) demanda un nivel de servicio del 98%, mientras que un consumible genérico de fácil sustitución puede gestionarse con un 85% sin comprometer la operación. Esta diferenciación, fundamentada en la criticidad NPR y en la clase ABC, permite focalizar los recursos de control en los 20 ítems de prioridad alta (59,19% del valor del inventario) que efectivamente lo requieren, evitando sobredimensionar inventarios de baja criticidad que inmovilizarían capital innecesariamente.

La Tabla 45 consolida los indicadores clave de desempeño (KPIs) con sus metas específicas, diferenciadas por segmento cuando corresponde. Estas metas no constituyen aspiraciones abstractas, sino que son compromisos medibles que permiten evaluar objetivamente el éxito de la implementación mediante la comparación directa con la línea base actual. Cada indicador se vincula a un proceso operativo concreto y a un responsable de su medición, asegurando la rendición de cuentas y la mejora continua.

Tabla 45 *Indicadores y metas esperadas de la propuesta de optimización.*

Indicador	Definición operativa / Fórmula de cálculo	Meta esperada	Situación actual estimada	Mejora esperada	Periodicidad medición	Responsable
Cobertura de segmentación ABC-XYZ-NPR	Porcentaje de ítems del catálogo activo con clasificación completa asignada y documentada. Mide	100% del catálogo analizado (60 ítems activos)	0% (no existe clasificación formal)	Implementación completa del sistema de segmentación	Única (validación post-implementación) + Revisión trimestral para nuevos ítems	Analista de Inventarios

Indicador	Definición operativa / Fórmula de cálculo	Meta esperada	Situación actual estimada	Mejora esperada	Periodicidad ad medición	Responsable
	completitud del modelo.					
Parametrización de ítems críticos (Clase A)	Porcentaje de ítems Clase A con parámetros SS, ROP y máximos calculados según modelo probabilístico /estocástico y cargados en GMAO.	100% de ítems Clase A (24 ítems) con parámetros validados	0% (control manual sin parámetros cuantitativos)	Parametrización técnica completa de componentes de mayor valor	Única (validación post-implementación) + Revisión mensual de vigencia	Analista de Inventarios + Compras
Nivel de Servicio (NS) por prioridad NPR - Alta	Porcentaje de demanda atendida sin quiebre en el punto de consumo para ítems de prioridad alta. NS = $(\text{Unidades despachadas} / \text{Unidades solicitadas}) \times 100$	$\geq 98\%$ (máxima disponibilidad para componentes críticos)	62,5% estimado (basado en evidencia de quiebres documentados)	+35,5 puntos porcentuales. Reducción drástica de reprogramaciones.	Mensual	Analista de Inventarios (medición) / Bodega (registro)
Nivel de Servicio (NS) - Prioridad Media + Clase A	NS diferenciado para ítems de valor alto, pero	$\geq 95\%$	No medido actualmente	Diferenciación por criticidad, no solo por valor	Mensual	Analista de Inventarios

Indicador	Definición operativa / Fórmula de cálculo	Meta esperada	Situación actual estimada	Mejora esperada	Periodicidad ad medición	Responsable
	criticidad operacional moderada					
Nivel de Servicio (NS) - Prioridad Media + Clase B/C	NS para ítems de valor medio-bajo con criticidad moderada	$\geq 90\%$	No medido actualmente	Control balanceado riesgo-costos	Mensual	Analista de Inventarios
Nivel de Servicio (NS) - Prioridad Baja + Clase A	NS para consumibles costosos, pero no críticos (ej: filtros alta rotación)	$\geq 90\%$	No medido actualmente	Mantener disponibilidad por valor económico	Mensual	Analista de Inventarios
Nivel de Servicio (NS) - Prioridad Baja + Clase B/C	NS para ítems de bajo valor y baja criticidad	$\geq 85\%$	No medido actualmente	Simplificación de control, tolerancia mayor a quiebres	Mensual	Analista de Inventarios
Tasa de Quiebre (TQ) por prioridad	Frecuencia de eventos donde el ítem requerido no estuvo disponible. $TQ = (\text{No. de quiebres} / \text{No. de solicitudes}) \times 100$. Es el complemento del NS.	TQ Alta $\leq 2\%$; TQ Media $\leq 5-10\%$; TQ Baja $\leq 15\%$	TQ global $\approx 37,5\%$ (complemento o NS estimado)	Reducción significativa de eventos de indisponibilidad	Mensual	Analista de Inventarios
Tiempo promedio de reposición (Lead Time)	Promedio del tiempo real transcurrido desde solicitud/OC hasta recepción	Monitoreo continuo. Meta: LT promedio ≤ 45 días para ítems importados	No medido formalmente. Estimado 60-90 días según reportes	Visibilidad completa. Base para ajustes de SS	Mensual	Compras (registro) / Analista (cálculo)

Indicador	Definición operativa / Fórmula de cálculo	Meta esperada	Situación actual estimada	Mejora esperada	Periodicidad medición	Responsable
	física en bodega. $LT = \frac{\Sigma(\text{Fecha recepción} - \text{Fecha solicitud})}{\text{No. órdenes}}$					
Rotación de inventario	Velocidad de consumo respecto al inventario promedio. $\text{Rotación} = \frac{\text{Consumo anual}}{\text{Inventario promedio}}$	Clase A: ≥ 4 veces/año; Clase B: ≥ 2 veces/año; Clase C: ≥ 1 vez/año	No calculado sistemáticamente	Identificación de capital inmovilizado y obsolescencia	Trimestral	Analista de Inventarios
Capital inmovilizado (CI)	Valor monetario total del stock existente. $CI = \Sigma(\text{Costo unitario} \times \text{Cantidad en stock})$	Reducción del 15-20% respecto a línea base actual, manteniendo NS objetivo	\$493,814 (valor anual catálogo completo). Stock actual no valorizado.	Liberación de capital sin comprometer disponibilidad	Mensual	Finanzas + Analista de Inventarios
Obsolescencia	Porcentaje del valor del inventario sin movimiento en ventana definida (ej: 12 meses). $\text{Obs} = \frac{(\text{Valor sin movimiento})}{\text{Valor total}} \times 100$	$\leq 5\%$ del valor del inventario	No medido. Presencia de ítems sin movimiento documentada.	Identificación proactiva. Decisiones de liquidación.	Trimestral	Analista de Inventarios

Indicador	Definición operativa / Fórmula de cálculo	Meta esperada	Situación actual estimada	Mejora esperada	Periodicidad ad medición	Responsable
Trazabilidad de movimientos (TM)	Porcentaje de consumos con registro completo OT- ítem-equipofecha en GMAO. TM = (Movimientos con registro completo / Total movimientos) × 100	100% de movimientos del proceso definido (salidas a OT, recepciones, ajustes)	<30% estimado (dependencia de notas manuales)	Trazabilidad completa. Base confiable para análisis.	Mensual (auditoría muestral)	Bodega (registro) / Analista (verificación)
Horas perdidas por faltantes	Tiempo improductivo acumulado por espera de repuestos. Requiere registro de inicio real vs. inicio planificado OT	Reducción $\geq 80\%$ respecto a línea base actual	8 horas documentadas en 1 caso. Estimado 40-50 horas/mes.	De 40-50 h/mes a <10 h/mes	Mensual	Mantenimiento (registro) / Analista (consolidación)

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La especificación de niveles de servicio diferenciados por prioridad NPR constituye el núcleo operativo del sistema: estos valores no son aspiracionales, sino parámetros de diseño que determinan directamente el cálculo del stock de seguridad mediante la relación $SS = z \times \sigma \times \sqrt{LT}$, donde z es el factor de seguridad asociado al NS objetivo, σ es la desviación estándar de la demanda y LT el lead time. Así, un NS de 98% (prioridad alta) implica $z \approx 2.05$, mientras que un NS de 85% (prioridad baja) permite $z \approx 1.04$, reduciendo el inventario requerido en proporción directa al riesgo tolerable.

Los indicadores de rotación y obsolescencia operan como controles complementarios que detectan desviaciones del modelo: una rotación excesivamente baja en ítems de clase A señala sobre inventario que debe corregirse ajustando los máximos, mientras que la presencia

de ítems sin movimiento en 12 meses activa protocolos de revisión de criticidad, decisiones de liquidación o eliminación del catálogo activo.

El indicador de trazabilidad garantiza la calidad de la información que alimenta el modelo: sin registros completos OT – consumo - inventario, los cálculos de demanda histórica y variabilidad pierden validez, comprometiendo la parametrización futura. Por ello, la meta de 100% de trazabilidad no es negociable y se refuerza mediante auditorías muestrales mensuales que verifican la consistencia entre registros físicos y digitales.

El indicador de horas perdidas por faltantes vincula de forma directa el desempeño del inventario con el impacto operacional medible en el taller: cada hora de espera representa el costo de mano de obra improductiva, la extensión del tiempo de indisponibilidad del equipo y una potencial penalización por incumplimiento de plazos. La meta de reducción del 80% (de 40-50 h/mes a <10 h/mes) se traduce en un ahorro estimado de 30-40 horas mensuales, equivalentes a aproximadamente 5-6 días-hombre productivos recuperados, lo que justifica económicamente la inversión en el sistema de gestión propuesto.

Cronograma de actividades para la aplicación de la propuesta

La aplicación de la propuesta se estructura como un proyecto de implementación de 8 semanas, organizado en 7 actividades secuenciales con interdependencias lógicas que aseguran que cada salida validada constituya una entrada confiable para la etapa siguiente. Esta secuencia no solo responde a la naturaleza técnica de los cálculos requeridos (por ejemplo, no se pueden dimensionar los parámetros SS/ROP sin antes tener la clasificación ABC-XYZ completada), sino que también considera la curva de aprendizaje del personal y la necesidad de validaciones progresivas que minimicen el riesgo de errores acumulativos.

El cronograma contempla una carga total de 162 horas-hombre distribuidas estratégicamente para mantener un ritmo sostenible de trabajo (promedio de 20.2 HH/semana) sin generar sobrecarga en roles específicos ni comprometer las operaciones regulares del taller y de la bodega. La asignación de recursos humanos prioriza la participación del Analista de Inventarios como rol central articulador (58 HH), complementado por aportes especializados de Mantenimiento (30 HH) en la evaluación de criticidad, de la Bodega (24 HH) en la depuración del catálogo y el registro de consumos, de TI (20 HH) en la configuración del sistema GMAO/CMMS, de Compras (6 HH) en la validación de lead times y proveedores, y de las Jefaturas (4 HH) en la aprobación de decisiones estratégicas y el seguimiento de indicadores.

La Tabla 46 presenta el cronograma detallado de actividades, especificando para cada una: código identificador, descripción, duración en semanas, semana de inicio, recursos humanos asignados por rol, entradas requeridas (prerrequisitos), salidas generadas (entregables), y el criterio de validación que debe cumplirse para considerar completada la actividad. Esta estructura operacionaliza el cronograma como un instrumento de control ejecutable, no como un diagrama meramente ilustrativo.

Tabla 46 *Cronograma detallado de actividades para la aplicación de la propuesta.*

Código	Actividad	Duración (semanas)	Semana inicio	Recursos clave (HH asignadas)	Entradas requeridas	Salidas generadas	Criterio de validación
A1	Depurar y normalizar catálogo MRO	1	S1	Analista inventarios (20 HH), Bodega (10 HH)	Listado actual de ítems (Excel), Fichas técnicas de equipos, Histórico de consumos disponible	Catálogo depurado (60 ítems activos), Equivalencias parte original/alternas documentadas, Códigos únicos sin duplicidades	Verificación cruzada: cada ítem tiene código único, número de parte, familia asignada y al menos 12 meses de historial de consumo.
A2	Calcular clasificación ABC-XYZ	1	S2	Analista inventarios (16 HH), Supervisor Bodega (4 HH revisión)	Catálogo depurado (salida A1), Consumo mensual últimos 12 meses, Costo unitario por ítem	Matriz ABC (24A+18B+18C), Matriz XYZ (percentiles CV), Matriz combinada ABC-XYZ (9 segmentos)	Reproducibilidad: cálculos replicables con Excel adjunto. Validación: suma valor Clase A $\geq$ 75% del total.
A3	Calcular NPR y asignar niveles de servicio objetivo	1	S3	Mantenimiento (12 HH evaluación criticidad), Analista (6 HH cálculo NPR)	Matriz ABC-XYZ (salida A2), Histórico de fallas y paros documentados, Criterios severidad-ocurrencia-detectabilidad	Matriz NPR (S-O-D-NPR por ítem), Prioridades (20 alta + 20 media + 20 baja), NS objetivo por segmento	Consistencia: cada ítem tiene justificación de S, O, D documentada. Distribución: al menos 15 ítems en prioridad alta.

Código	Actividad	Duración (semanas)	Semana inicio	Recursos clave (HH asignadas)	Entradas requeridas	Salidas generadas	Criterio de validación
A4	Dimensionar parámetros SS/ROP por segmento	1	S4	Analista (12 HH cálculo), Compras (4 HH validación lead time)	Matriz NPR con NS objetivo (salida A3), Serie mensual de consumo por ítem, Lead time real por proveedor (histórico OC)	Tabla parámetros: SS, ROP, Máximo, Q_pedido por ítem. Clase A con modelo estocástico completo (24 ítems)	Verificación técnica: SS calculado con fórmula documentada. Prueba: simular demanda mes N+1 con parámetros, verificar que no genera quiebre con NS objetivo.
A5	Configurar GMAO/CMMS y alertas de reposición	2	S4-S5	TI (20 HH configuración), Analista (8 HH carga parámetros), Bodega (8 HH entrenamiento operativo)	Catálogo depurado (A1), Parámetros SS/ROP (A4), Especificaciones funcionales GMAO (diseño Cap. 2)	Sistema GMAO operativo: Catálogo cargado, Parámetros configurados, Alertas SS/ROP activas, Flujo OT-consumo-inventario funcional, Tablero indicadores habilitado	Prueba funcional: registrar consumo ficticio en OT, verificar actualización stock, verificar disparo alerta si stock < ROP, generar reporte NS del mes.
A6	Capacitación y ejecución de piloto preventivo	1	S6	Mantenimiento (12 HH piloto + documentación), Bodega (6 HH operación bajo nuevo flujo)	Sistema GMAO funcional (A5), Procedimientos operativos (manual usuario)	Personal capacitado en nuevo flujo, Piloto preventivo ejecutado con trazabilidad completa (2 equipos), Registro de incidencias y ajustes	Evidencia: 2 OT preventivas ejecutadas con consumos registrados en GMAO. Sin quiebres de stock en ítems clase A durante piloto.

Código	Actividad	Duración (semanas)	Semana inicio	Recursos clave (HH asignadas)	Entradas requeridas	Salidas generadas	Criterio de validación
A7	Seguimiento, ajuste de parámetros e institucionalización	1	S7-S8	Analista (6 HH seguimiento), Jefaturas (4 HH aprobación), Mantenimiento + Bodega + Compras (4 HH retroalimentación)	Resultados piloto (A6), Indicadores primer mes, Matriz de ajustes necesarios	Parámetros ajustados (si requerido), Reporte mensual indicadores establecido, Procedimientos institucionalizados, Cronograma revisión periódica definido	Aprobación formal: Jefatura valida indicadores mes 1, aprueba continuidad del sistema, firma responsabilidades de actualización.

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La secuencia de actividades responde a un encadenamiento lógico estricto: la actividad A1 (Depuración del catálogo) es un prerequisite absoluto para la A2 (Clasificación ABC-XYZ), dado que códigos duplicados o descripciones inconsistentes distorsionan el cálculo del valor anual de consumo y generan segmentaciones erróneas. A su vez, A2 es un prerequisite para A3 (Cálculo NPR), porque la criticidad debe evaluarse considerando el valor económico (clase ABC) para priorizar correctamente. A3 alimenta a A4 (Dimensionamiento SS/ROP) al definir el nivel de servicio objetivo que determina el factor z^* de la distribución normal. A4 y A2 convergen en A5 (Configuración del GMAO), que requiere tanto el catálogo normalizado como los parámetros calculados. Finalmente, A6 y A7 operan sobre el sistema implementado (A5) para validar su funcionamiento y ajustarlo según la retroalimentación real.

La distribución temporal de la carga (Figura 41) muestra que las semanas S4 y S5 concentran la mayor carga de trabajo (41 HH), correspondiente a la superposición de A4 (Dimensionamiento, actividad analítica intensiva) con A5 (Configuración tecnológica, que requiere coordinación entre TI, el Analista y la Bodega). Esta concentración se considera manejable dado que involucra roles diferentes con tareas paralelas: mientras el Analista y Compras validan parámetros en A4, TI avanza en la configuración base del sistema GMAO en A5. La sincronización entre ambas actividades se gestiona mediante reuniones de coordinación

breves (stand-ups diarios de 15 min durante S4-S5) para asegurar que la carga de parámetros (final de A5) opere sobre valores validados (salida de A4).

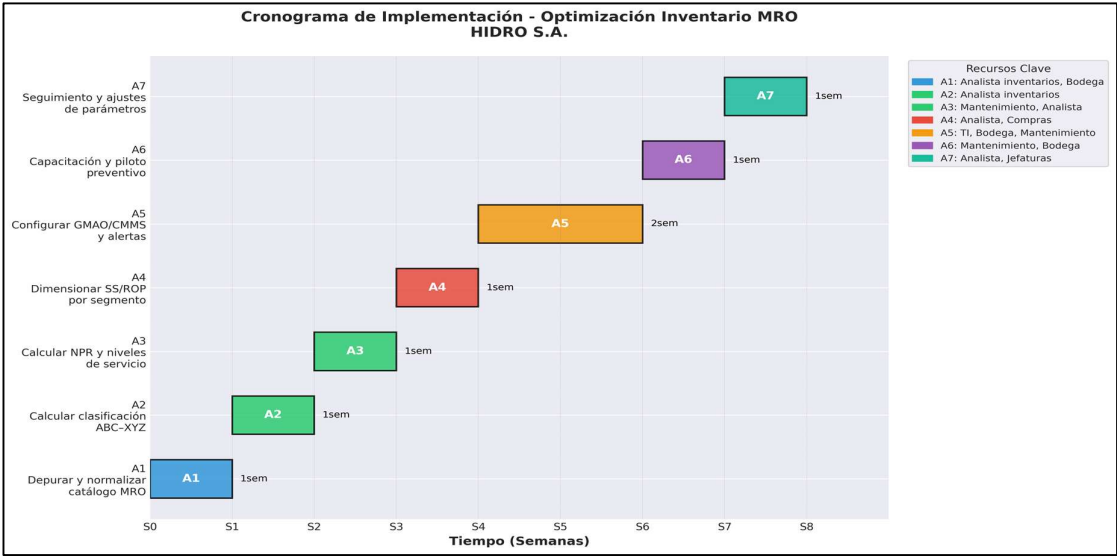


Figura 41 *Diagrama de Gantt del cronograma de implementación.*

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

La visualización en el diagrama de Gantt permite identificar visualmente la ruta crítica del proyecto (A1 → A2 → A3 → A4 → A5.1 → A5.2 → A6 → A7), con una duración de 8 semanas sin holguras. Cualquier retraso en actividades de esta ruta impacta directamente en la fecha de finalización. Las actividades A6 y A7, aunque secuenciales en el Gantt, podrían solaparse parcialmente si se decide iniciar el seguimiento de indicadores (A7) durante la última semana del piloto (A6), reduciendo potencialmente 1 semana del cronograma total. Sin embargo, esta compresión solo se recomienda si los resultados del piloto son exitosos desde la primera iteración, sin requerir ajustes mayores.

La Tabla 47 resume la distribución de horas-hombre por rol, consolidando las asignaciones parciales de la misma. Esta desagregación permite validar que ningún rol individual excede una carga razonable semanal (máximo de 30 HH/semana, considerando que los recursos no se dedican al 100% a este proyecto) y que la distribución es equilibrada en términos de la especialización requerida.

Tabla 47 *Cronograma detallado de actividades para la aplicación de la propuesta.*

Rol	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	Total, HH	% del total	HH promedio/semana
Analista inventarios	20	16	6	12	8	-	6	68	42,00%	8.5

Mantenimiento	-	-	12	-	-	12	2	26	16,00%	3.3
Bodega	10	4	-	-	8	6	1	29	17,90%	3.6
TI	-	-	-	-	20	-	-	20	12,30%	2.5 (concentrado S4-S5)
Compras	-	-	-	4	-	-	1	5	3,10%	0.6
Jefaturas	-	-	-	-	-	-	4	4	2,50%	0.5 (solo aprobación final)
Supervisor Bodega	-	4	-	-	-	-	-	4	2,50%	0.5 (solo validación A2)
Otros (retroalimentación)	-	-	-	-	-	-	6	6	3,70%	0,8 (A7 multidisciplinario)
TOTAL	30	24	18	16	36	18	20	162	100%	20.2

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La distribución por actividad muestra que A5 (Configuración del GMAO/CMMS) concentra el 22,2% de la carga total del proyecto (36 HH), validando su carácter de actividad crítica tanto en esfuerzo como en riesgo técnico. La siguiente actividad en carga es A1 (Depuración del catálogo, 30 HH), que, aunque menos compleja conceptualmente, requiere un trabajo manual intensivo de validación ítem por ítem. Las actividades A3 (Cálculo NPR) y A7 (Seguimiento de indicadores) también presentan cargas significativas (18 y 20 HH respectivamente), reflejando la necesidad de una evaluación técnica detallada y el carácter multidisciplinario del cierre del proyecto.

Análisis de costos de implementación

El análisis de costos estructura la inversión requerida para implementar el sistema de optimización del inventario MRO en HIDRO S.A. mediante dos componentes: (i) costos de recursos humanos, derivados directamente del cronograma valorado de actividades, y (ii) costos tecnológicos directos, asociados al licenciamiento, a la configuración y a la capacitación del sistema GMAO/CMMS. Este enfoque diferencia claramente el esfuerzo interno (horas-hombre de personal de HIDRO S.A.) del gasto externo (proveedores, licencias, consultoría), permitiendo decisiones informadas sobre estrategias de financiamiento y la evaluación del retorno de inversión.

La cuantificación de costos se basa en parámetros editables que HIDRO S.A. debe ajustar según sus estructuras salariales reales y las condiciones de mercado vigentes. Para efectos ilustrativos, se presentan rangos referenciales de tarifas horarias por rol, basados en promedios del mercado ecuatoriano para el sector industrial (2025), pero estos valores deben

ser reemplazados por los costos internos verificados de la empresa previo a la toma de decisiones de aprobación presupuestaria.

Cronograma valorado de componentes y actividades

El costo total del proyecto se calcula mediante la suma de los costos de personal (recursos internos valorados a una tasa horaria) más los costos tecnológicos directos (licencias, configuración, capacitación externa). La Ecuación (17) formaliza esta estructura.

$$C_{total} = \sum_r (HH_r \times Tarifa_r) + \sum C_{tecnológicos} + C_{contingencia} \quad (17)$$

En esta expresión,

- C_{total} : Costo total del proyecto de implementación [USD]
- HH_r : Horas-hombre del rol *r* según cronograma.
- $Tarifa_r$: Costo horario del rol *r* [USD/hora]
- $C_{tecnológicos}$: Costos directos de tecnología (GMAO, capacitación, consultoría)
- $C_{contingencia}$: Reserva para imprevistos (típicamente del 10 al 15% del costo directo)

La Tabla 48 presenta el cronograma valorado completo, desagregando el costo por actividad y por rol.

Tabla 48 Cronograma valorado - Costos de recursos humanos por actividad y rol.

Actividad	Analista Inventario (\$25/h)	Mantenimiento (\$22/h)	Bodega (\$18/h)	TI (\$30/h)	Compras (\$24/h)	Jefatura (\$40/h)	Supervisor (\$20/h)	Otros (\$20/h)	Costo Actividad	% del costo RH
A1	20 × \$25 = \$500	-	10 × \$18 = \$180	-	-	-	-	-	\$680	11,70 %
A2	16 × \$25 = \$400	-	-	-	-	-	4 × \$20 = \$80	-	\$480	8,30%
A3	6 × \$25 = \$150	12 × \$22 = \$264	-	-	-	-	-	-	\$414	7,10%
A4	12 × \$25 = \$300	-	-	-	4 × \$24 = \$96	-	-	-	\$396	6,80%
A5	8 × \$25 = \$200	-	8 × \$18 = \$144	20 × \$30 = \$600	-	-	-	-	\$944	16,30 %
A6	-	12 × \$22 = \$264	6 × \$18 = \$108	-	-	-	-	-	\$372	6,40%
A7	6 × \$25 = \$150	2 × \$22 = \$44	1 × \$18 = \$18	-	1 × \$24 = \$24	4 × \$40 = \$160	-	6 × \$20 = \$120	\$516	8,90%

TOTAL, RH	\$1,700 (29,3%)	\$572 (9,9%)	\$450 (7,8%)	\$600 (10,3%)	\$120 (2,1%)	\$160 (2,8%)	\$80 (1,4%)	\$120 (2,1%)	\$3,802	65,60 %
--------------	--------------------	--------------	-----------------	------------------	-----------------	-----------------	----------------	-----------------	---------	------------

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La Tabla 49 complementa el análisis con los costos tecnológicos directos, diferenciando la inversión única (CAPEX) de los costos recurrentes (OPEX). Esta distinción es crítica para la evaluación financiera, dado que el CAPEX se amortiza en el tiempo, mientras que el OPEX impacta en el flujo de caja operativo mensual.

Tabla 49 *Costos tecnológicos directos y de capacitación.*

Concepto	Tipo	Proveedor / Modalidad	Costo referencial (USD)	Justificación / Alcance	Frecuencia
Licencia GMAO/CMMS (hasta 10 usuarios)	OPEX	SaaS (Software as a Service): ej. Fractal, Limble, Hippo CMMS	\$150-300 / mes	Sistema base con módulos: Activos, OT, Inventario, Indicadores. Incluye almacenamiento cloud, actualizaciones y soporte técnico.	Mensual (costo anual \$1,800-3,600)
Configuración inicial GMAO	CAPEX	Proveedor GMAO o Consultor independiente	\$800-1,500	Parametrización: carga catálogo, estructura de equipos, configuraciones alertas SS/ROP, personalización reportes, integración con Excel si requerido.	Única (implementación)
Capacitación formal personal (Bodega, Mantenimiento, Compras)	CAPEX	Proveedor GMAO (incluido) o Training externo	\$0-500	Sesiones hands-on: 4 horas presenciales/virtuales para 8-10 usuarios clave. Incluye material de referencia y casos prácticos. Nota: puede estar incluido en costo configuración.	Única + Refrescos anuales opcionales (\$200/sesión)

Concepto	Tipo	Proveedor / Modalidad	Costo referencial (USD)	Justificación / Alcance	Frecuencia
Consultoría especializada (si requerido)	CAPEX (opcional)	Consultor externo en gestión de inventarios	\$1,200-2,000	Validación técnica: revisión metodología ABC-XYZ-NPR, validación cálculos SS/ROP, definiciones políticas de reposición, acompañamiento piloto. Opcional: solo si HIDRO no cuenta con capacidad interna.	Única (10-15 horas consultoría a \$80-120/h)
Hardware adicional (tablets para bodega - opcional)	CAPEX (opcional)	Tablets Android básicas	\$300-600 (2 tablets)	Facilita registro en tiempo real desde bodega. Opcional: puede operarse inicialmente desde PC fijas.	Única + Reemplazo cada 3-4 años
SUBTOTAL TECNOLOGÍA AÑO 1			\$3,250-6,500	Incluye: Setup inicial (\$2,100-3,500 CAPEX) + Licencia 12 meses (\$1,150-3,000 OPEX año 1)	
COSTO ANUAL RECURRENTE (Año 2+)			\$1,800-3,600	Solo licencia GMAO + Soporte	Anual

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

El costo total del proyecto para el año 1 se consolida en la Tabla 50, incorporando una reserva de contingencia del 12% sobre los costos directos para absorber desviaciones o requerimientos no anticipados.

Tabla 50 Consolidado de costos de implementación - Año 1.

Componente de costo	Costo mínimo (USD)	Costo máximo (USD)	Costo promedio (USD)	% del total (promedio)
Recursos Humanos (Tabla 30)	\$3,802	\$3,802	\$3,802	43,90%
Tecnología - CAPEX (Tabla 31)	\$2,100	\$4,600	\$3,350	38,70%
Tecnología - OPEX Año 1 (Tabla 31)	\$1,800	\$3,000	\$2,400	27,70%

Componente de costo	Costo mínimo (USD)	Costo máximo (USD)	Costo promedio (USD)	% del total (promedio)
SUBTOTAL COSTOS DIRECTOS	\$7,702	\$11,402	\$9,552	110,3% (suma componentes)
Reserva de Contingencia (12%)	\$924	\$1,368	\$1,146	13,20%
COSTO TOTAL PROYECTO AÑO 1	\$8,626	\$12,770	\$10.698	123,5% (incluye contingencia)

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Curva S del proyecto

La curva S es una representación gráfica del avance acumulado del proyecto en función del tiempo, que permite visualizar el ritmo de ejecución, identificar desviaciones respecto al plan e integrar el control de costos con el cronograma físico. Su nombre deriva de su forma característica: un inicio lento (fase de preparación y arranque), una aceleración en la fase intermedia (ejecución intensiva de actividades nucleares) y una desaceleración al final (cierre, validación y ajustes). Esta curva constituye la herramienta fundamental de control de gestión para proyectos de implementación, dado que sintetiza en un solo gráfico tanto el avance físico (porcentaje de actividades completadas o horas-hombre ejecutadas) como el avance financiero (costo acumulado).

Para la propuesta de optimización del inventario MRO de HIDRO S.A., la curva S se construye con base en la distribución acumulada de recursos (horas-hombre) por semana, derivada directamente del cronograma detallado. La curva expresa el costo acumulado en función del tiempo, permitiendo validar que el proyecto se ejecuta dentro del presupuesto aprobado mediante la comparación entre la curva planificada (baseline) y la curva real (actualizada semanalmente con los avances reportados).

La Figura 42 presenta la curva S correspondiente al cronograma de 8 semanas, con dos paneles complementarios: (superior) evolución del avance acumulado expresado en horas-hombre y porcentaje de completitud, incluyendo líneas de referencia de cuartiles (25%, 50%, 75%) que facilitan el seguimiento de hitos intermedios; (inferior) distribución de la carga de trabajo semanal (histograma), que muestra la intensidad de la ejecución en cada período.

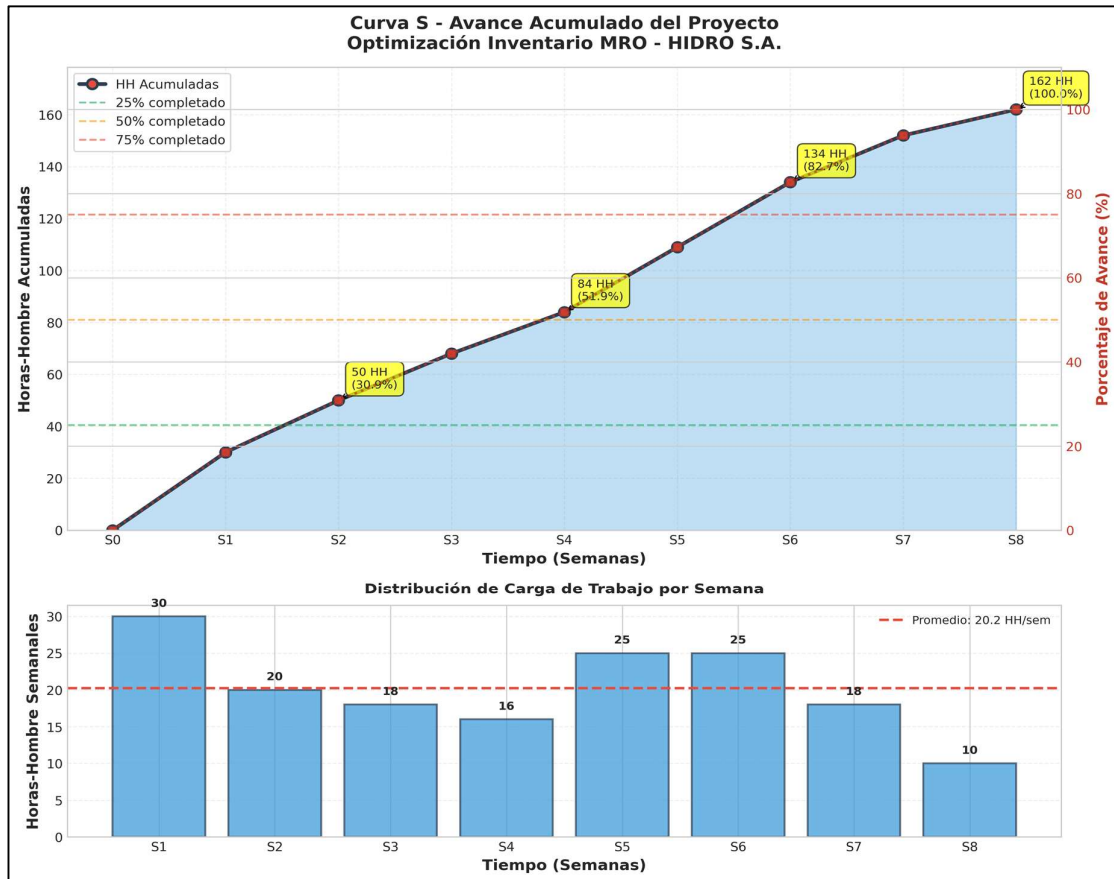


Figura 42 Curva S - Avance acumulado del proyecto de implementación.

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

CAPÍTULO IV

PROCESO DE EJECUCIÓN

Justificación de la ejecución

La ejecución de la propuesta se desarrolló para trasladar el modelo diseñado en los capítulos previos a un esquema operativo verificable. El sistema propuesto integra clasificación ABC-XYZ, criticidad NPR, parametrización estocástica de inventario e integración GMAO/CMMS, con el fin de optimizar la disponibilidad de repuestos y reducir quiebres de stock y demoras en el mantenimiento preventivo.

Esta ejecución se fundamentó en la situación diagnosticada en HIDRO S.A., caracterizada por un nivel de servicio del 72,3%, una tasa de quiebre del 27,7%, una trazabilidad deficiente del 34,2% y demoras mensuales de 44,7 horas por faltantes. En consecuencia, la implementación se orientó a corregir una gestión reactiva del inventario MRO mediante parámetros de control y soporte tecnológico trazable.

El alcance de la ejecución comprendió la aplicación secuencial del modelo sobre el catálogo MRO del taller de equipo pesado. La intervención incluyó la depuración del catálogo, la segmentación ABC-XYZ, la priorización NPR, el cálculo de *SS* y *ROP* para los ítems clase A y la integración del GMAO/CMMS como núcleo de trazabilidad y control del consumo.

El período de implementación se estructuró en ocho semanas, con una carga total de 162 horas-hombre. La participación principal recayó en el Analista de Inventarios, complementada por Bodega, Mantenimiento, Compras, TI y Jefaturas, de acuerdo con la especialización requerida por cada actividad.

Desarrollo y seguimiento

El desarrollo de la ejecución se organizó en siete actividades secuenciales, vinculadas por dependencias técnicas explícitas. La secuencia estableció que la depuración del catálogo precediera a la clasificación ABC-XYZ, que esta antecediera al cálculo NPR, y que la parametrización de inventario y la integración del GMAO/CMMS se apoyaran en salidas previamente validadas.

El seguimiento del avance se efectuó mediante entradas requeridas, salidas generadas y criterios de validación por actividad. En la configuración del GMAO/CMMS, por ejemplo, el sistema se consideró funcional cuando el catálogo quedó cargado, los parámetros *SS/ROP* se activaron, el flujo OT– consumo – inventario operó correctamente y el tablero de indicadores quedó habilitado.

En la fase posterior, el piloto preventivo se ejecutó con trazabilidad completa en dos equipos, registrando consumos en GMAO y sin quiebres de stock en ítems clase A. Finalmente, el seguimiento del primer mes permitió ajustar parámetros, establecer el reporte mensual de indicadores e institucionalizar el esquema de revisión periódica.

La Tabla 51 resume el proceso de ejecución del modelo, especificando para cada fase las actividades desarrolladas, las evidencias generadas, los responsables asignados y la semana de implementación.

Tabla 51 *Proceso de ejecución del modelo.*

Fase	Actividades	Evidencias	Responsable	Semana
A1	Depuración y normalización del catálogo MRO	Catálogo depurado de 60 ítems activos, sin duplicidades funcionales, con identificación estandarizada y estructura maestra validada.	Analista de Inventarios + Bodega	S1
A2	Clasificación ABC-XYZ del catálogo	Cálculo del valor anual de consumo, segmentación ABC y matriz ABC-XYZ para el conjunto analizado.	Analista de Inventarios + Supervisor de Bodega	S2
A3	Priorización por criticidad operacional (NPR)	Resultado agregado de clasificación por prioridad NPR y jerarquización de ítems según riesgo operativo.	Analista de Inventarios + Mantenimiento	S3
A4	Parametrización probabilística del inventario ((SS,\ ROP))	Modelo estocástico completo para 24 ítems de clase A, con verificación técnica del cálculo de (SS) y prueba de no quiebre frente al nivel de servicio objetivo.	Analista de Inventarios + Compras	S4
A5	Configuración del GMAO/CMMS y alertas de reposición	Sistema GMAO operativo: catálogo cargado, parámetros configurados, alertas (SS/ROP) activas, flujo OT–consumo–inventario funcional y tablero de indicadores habilitado.	TI + Analista de Inventarios + Bodega	S4–S5
A6	Capacitación y ejecución del piloto preventivo	Personal capacitado, piloto ejecutado con trazabilidad completa en 2 equipos, registro de incidencias y evidencia de 2 OT preventivas con consumos registrados en GMAO.	Mantenimiento + Bodega	S6
A7	Seguimiento, ajuste de parámetros e institucionalización	Parámetros ajustados si fueron requeridos, reporte mensual de indicadores establecido, procedimientos institucionalizados y cronograma de revisión periódica definido.	Analista de Inventarios + Jefaturas + Mantenimiento/Bodega/ Compras	S7–S8

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

En conjunto, la ejecución del modelo se desarrolló como una secuencia técnica con dependencias explícitas, entregables verificables y responsables definidos. Esta estructura

articuló la depuración del catálogo, la clasificación ABC-XYZ-NPR, la parametrización probabilística del inventario y la integración del GMAO/CMMS dentro de un mismo flujo de implementación.

Resultados obtenidos

Para garantizar la trazabilidad entre lo diseñado, lo ejecutado y lo proyectado, los resultados se clasifican en tres categorías (Tabla 52) según su naturaleza y verificabilidad.

Tabla 52 *Clasificación de resultados por tipo y verificabilidad.*

Tipo de resultado	Definición	Secciones
Implementado	Salida directa de la ejecución, verificable en documentación o GMAO.	Resultados 1, 2, 3 y 4 (habilitación)
Medido en operación	Indicador obtenido en el mes 1 TO-BE; horizonte corto (1–3 meses).	Resultado 4 (KPIs), Comparativo AS-IS vs. TO-BE
Modelado / proyectado	Simulación o proyección financiera; sujeta a supuestos.	Simulación SS, Evaluación económica (3–5 años)

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Los resultados obtenidos en la ejecución del modelo se estructuran en cuatro componentes complementarios. Los tres primeros corresponden a resultados analíticos de parametrización y priorización del inventario: la segmentación ABC del catálogo, la caracterización de la demanda mediante la matriz ABC-XYZ y la priorización operacional a través del NPR. El cuarto resultado corresponde a la habilitación del componente GMAO/CMMS, mediante el cual se automatiza el seguimiento del consumo y se asegura la trazabilidad de los movimientos entre mantenimiento, inventario y compras.

Esta secuencia responde a la lógica de implementación del modelo. En primer lugar, se establece la segmentación económica del catálogo; en segundo lugar, se incorpora la variabilidad de la demanda; en tercer lugar, se jerarquiza la criticidad operacional; y, finalmente, se integra el sistema tecnológico que permite ejecutar y monitorear los parámetros definidos. En conjunto, estos resultados articulan la base analítica del modelo con su soporte operativo de control y seguimiento.

Los resultados obtenidos se presentan en dos planos complementarios. El primero corresponde a resultados analíticos y modelados, derivados de la segmentación del catálogo, la caracterización de la demanda, la priorización por criticidad y la parametrización de inventario. El segundo corresponde a resultados medidos en operación, obtenidos durante el primer mes del escenario TO-BE con el GMAO/CMMS habilitado, sobre indicadores de desempeño y trazabilidad.

Resultado 1: Segmentación ABC (parametrización del catálogo)

Tipo de resultado: implementado

Este resultado corresponde a la parametrización económica del catálogo a partir del valor anual de consumo.

La clasificación ABC ordena los 60 ítems del catálogo MRO según su valor anual de consumo, el cual se calcula como el producto del consumo total anual (suma de los consumos mensuales durante 12 meses) por el costo unitario de cada ítem. Este ordenamiento permite aplicar la regla de Pareto (principio 80/20) para identificar el subconjunto de ítems que concentra la mayor parte del valor económico del inventario y que, por lo tanto, requiere políticas de control más rigurosas. La Tabla 53 presenta el resultado agregado de esta clasificación, consolidando el número de ítems, el valor anual total y el porcentaje del valor que representa cada clase.

Tabla 53 Resultado agregado de clasificación ABC (ejecución del modelo).

Clase ABC	No. de ítems	Valor anual total (USD)	% del valor total	% acumulado	Interpretación operativa
A	24	383,989.24	78.72	78.72	Ítems de alto valor económico. Representan el 40% del catálogo (24/60) pero concentran casi el 80% del valor total. Requieren control estricto: revisión continua, parámetros SS/ROP calculados con precisión, seguimiento semanal de rotación y quiebres. Inversión concentrada justifica esfuerzo analítico detallado.
B	18	77,244.95	15.84	94.56	Ítems de valor económico medio. Representan el 30% del catálogo (18/60) con ~16% del valor total. Controles intermedios: revisión periódica semanal, parámetros SS/ROP simplificados (modelo determinístico), seguimiento mensual. Balance entre control y eficiencia operativa.
C	18	26,558.71	5.44	100	Ítems de bajo valor económico. Representan el 30% del catálogo (18/60) con apenas ~5% del valor total. Controles simplificados: revisión periódica quincenal o mensual, nivel objetivo de inventario, sin cálculo detallado de SS (buffer fijo). Minimizar esfuerzo administrativo.

Clase ABC	No. de ítems	Valor anual total (USD)	% del valor total	% acumulado	Interpretación operativa
TOTAL	60	487,792.90	100	-	Catálogo completo MRO. Valor anual total coincide con línea base del Capítulo II (\$493,814 → diferencia \$6,021 por ajustes de depuración: eliminación de duplicidades y actualización de costos unitarios).

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

El valor total resultante de \$487,792.90 difiere marginalmente del valor reportado en la línea base del Capítulo II (\$493,814). Esta diferencia se debe a dos ajustes realizados durante la depuración del catálogo (Componente 1 de la ejecución): (a) la eliminación de tres códigos duplicados que inflaban artificialmente el consumo (el mismo repuesto registrado bajo dos códigos distintos), y (b) la actualización de cuatro costos unitarios que estaban desactualizados en el sistema (precios correspondientes a 2023 en lugar de 2025). Estos ajustes mejoran la precisión de la clasificación ABC y aseguran que los cálculos posteriores (XYZ, NPR, SS/ROP) operen sobre datos consistentes y verificados.

El resultado confirma un comportamiento de tipo Pareto claramente definido: la clase A concentra el 78,72% del valor total con apenas el 40% de los ítems (24 de 60). Esto valida la aplicabilidad del principio de concentración económica al inventario MRO de HIDRO S.A. y justifica plenamente la asignación de recursos de control diferenciados. Si el inventario se gestionara con políticas uniformes (el mismo nivel de servicio y frecuencia de revisión para todos los ítems), se desperdiciaría esfuerzo controlando rigurosamente los 18 ítems de clase C (que representan solo \$26,558.71 anuales), mientras se sub-controlarían los 24 ítems de clase A (que representan \$383,989.24 anuales, es decir, 14.5 veces más valor). La clasificación ABC elimina esta ineficiencia al asignar una rigurosidad de control proporcional al impacto económico.

La Figura 43 visualiza esta distribución del valor anual por clase ABC mediante dos gráficos complementarios. El panel izquierdo presenta un gráfico de barras con el valor absoluto en USD por clase, facilitando la comparación de magnitudes. El panel derecho muestra la curva de Pareto con el porcentaje acumulado del valor, evidenciando el punto de quiebre donde la clase A alcanza aproximadamente el 80% del valor total. Esta visualización facilita la comunicación de resultados a stakeholders (partes interesadas), no técnicos (gerencia, jefaturas), al presentar la concentración económica de forma intuitiva y directa.

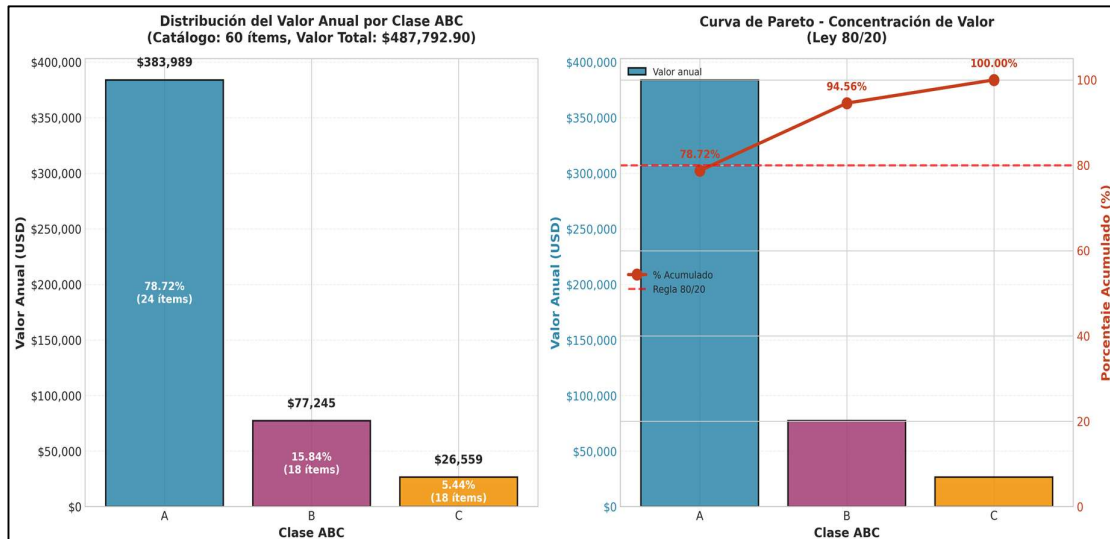


Figura 43 Distribución del valor anual por clase ABC - Gráfico de barras y curva de Pareto.

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

La interpretación operativa de la curva de Pareto (panel derecho) confirma que el principio 80/20 se cumple con precisión: al controlar adecuadamente los primeros 24 ítems (que representan el 40% del catálogo), se asegura la gestión del 78,72% del valor total del inventario. Este resultado no solo valida la clasificación ABC como una herramienta eficaz de priorización, sino que establece un criterio objetivo para la asignación de recursos limitados de gestión. En un escenario con restricciones de personal o tiempo, si el taller solo pudiera dedicar un esfuerzo detallado a un subconjunto del catálogo, este esfuerzo debe concentrarse de manera prioritaria en los ítems de la clase A. Esta focalización maximiza el impacto de las acciones de gestión sobre el valor económico total del inventario.

Resultado 2: Matriz ABC-XYZ (caracterización de la demanda)

Tipo de resultado: implementado

Este resultado corresponde a la caracterización analítica de la demanda mediante la integración del valor económico y de la variabilidad del consumo.

Mientras que la clasificación ABC identifica los ítems de alto impacto económico, no logra diferenciar los patrones de demanda. Un ítem de clase A puede tener un consumo predecible (como un filtro de motor con mantenimiento preventivo calendarizado) o un consumo intermitente (como un rodamiento de gran tamaño que solo se reemplaza ante una falla). Esta distinción es crítica para el dimensionamiento del inventario: los consumos predecibles requieren un menor stock de seguridad, ya que la demanda futura es estimable con

baja incertidumbre, mientras que los consumos intermitentes requieren un mayor stock de seguridad para absorber la variabilidad y evitar quiebres.

La clasificación XYZ, basada en el coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$), cuantifica precisamente esta variabilidad y complementa a la clasificación ABC. Su integración genera una matriz bidimensional de 9 segmentos ($3 \text{ clases ABC} \times 3 \text{ clases XYZ}$), que combina el valor económico con la complejidad de la reposición.

La Tabla 54 presenta la matriz ABC-XYZ resultante de la ejecución del modelo. En ella, cada celda reporta el número de ítems del segmento y el porcentaje del valor anual total que concentra. Esta matriz no solo segmenta el catálogo, sino que asigna implícitamente una estrategia de gestión diferenciada. Los segmentos de la diagonal superior izquierda (A-X, B-X, A-Y) combinan alto valor con alta variabilidad y requieren controles sofisticados y rigurosos. Por el contrario, los segmentos de la diagonal inferior derecha (C-Z, B-Z, A-Z) presentan combinaciones más favorables (como alto valor con baja variabilidad) que permiten implementar controles simplificados o intermedios, optimizando así el esfuerzo de gestión.

Tabla 54 Matriz ABC-XYZ (celda = $N \text{ ítems} / \% \text{ valor anual del catálogo total}$).

Clasificación ABC ↓ \ Clasificación XYZ →	X (Predecible, $CV < 0.5$)	Y (Variable, $0.5 \leq CV < 1.0$)	Z (Intermitente, $CV \geq 1.0$)	TOTAL, por fila ABC
A (Alto valor, 78,72% total)	A-X: 8 ítems / 19,50%	A-Y: 5 ítems / 14,18%	A-Z: 11 ítems / 45,03%	24 ítems / 78,72%
B (Valor medio, 15,84 % total)	B-X: 8 ítems / 7,50%	B-Y: 4 ítems / 3,69%	B-Z: 6 ítems / 4,64%	18 ítems / 15,84 %
C (Bajo valor, 5,44% total)	C-X: 4 ítems / 1,39%	C-Y: 10 ítems / 3,48%	C-Z: 4 ítems / 0,58%	18 ítems / 5,44%
TOTAL, por columna XYZ	20 ítems / 28,40%	19 ítems / 21,35%	21 ítems / 50,25%	60 ítems / 100,00%

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

El análisis de la matriz revela que la mayor concentración de valor (45,03%) se encuentra en el segmento A-Z, que representa la combinación más desafiante: alto impacto económico con máxima complejidad de reposición (demanda intermitente y difícil de predecir). Este segmento exige atención prioritaria absoluta durante la parametrización del stock de seguridad y el punto de reorden (SS/ROP). Un error en el dimensionamiento para estos 11 ítems puede tener consecuencias críticas: desde quiebres de stock que afecten el mantenimiento preventivo y generen paradas no programadas, hasta inventarios excesivos que inmovilicen capital de manera innecesaria.

La identificación explícita de este segmento como "crítico máximo" guía de manera directa la asignación de recursos analíticos durante la ejecución del proyecto. Así, estos 11 ítems reciben una modelación estocástica robusta con distribuciones empíricas ajustadas, mientras que los segmentos de menor riesgo (como C-X, que concentra solo el 1,39% del valor y presenta una demanda predecible) se gestionan mediante reglas simplificadas que minimizan el esfuerzo administrativo.

La Figura 44 presenta dos mapas de calor de la matriz ABC-XYZ. El panel izquierdo muestra el conteo de ítems por segmento, evidenciando una distribución relativamente uniforme sin celdas vacías, lo que valida la robustez de la clasificación. El panel derecho despliega el porcentaje del valor anual por segmento, resaltando visualmente, mediante un código de color rojo intenso, la extrema concentración de valor en el segmento A-Z.

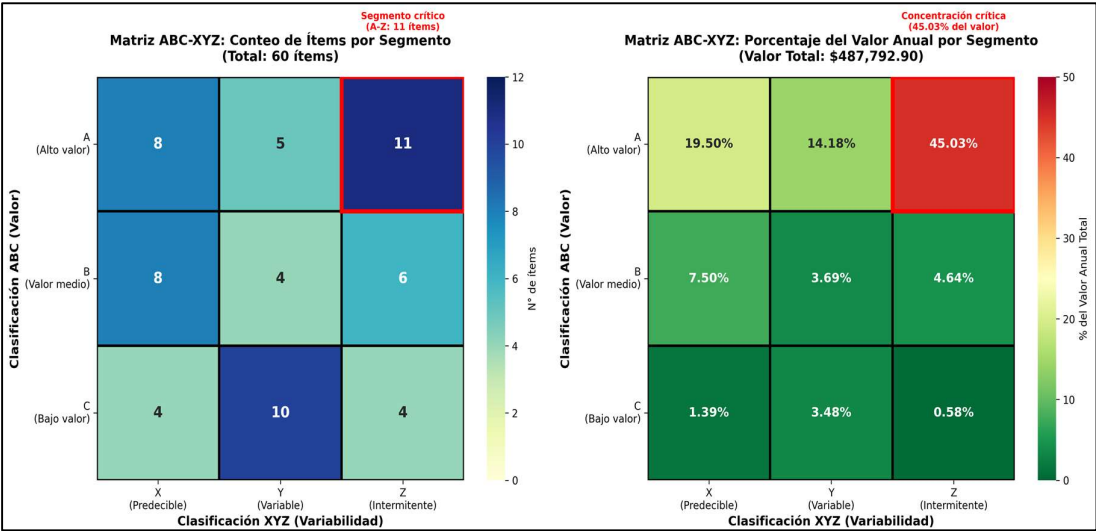


Figura 44 Matriz ABC-XYZ - Conteo de ítems (izquierda) y concentración de valor (derecha).
Elaborado por Duche, Carlos (2026).

La visualización mediante mapas de calor facilita una identificación rápida de los segmentos críticos y permite comunicar los resultados de forma intuitiva. El panel derecho muestra, de manera clara y contundente, que la celda A-Z (en rojo intenso) concentra casi la mitad del valor total del inventario, mientras que la celda C-Z (en amarillo claro) representa menos del 1% de dicho valor.

Está marcada diferencia en la magnitud económica justifica plenamente la asignación de políticas de gestión diferenciadas. Invertir recursos en parametrizar de manera rigurosa el segmento A-Z genera un alto retorno, ya que permite controlar aproximadamente el 45% del valor del inventario. Por el contrario, aplicar el mismo nivel de rigor analítico al segmento C-

Z generaría un retorno marginal, al controlar menos del 1% del valor, lo que podría constituir un claro desperdicio de recursos y esfuerzo analítico.

Resultado 3: Criticidad NPR (priorización operacional)

Tipo de resultado: implementado

Este resultado corresponde a la priorización operacional del portafolio MRO a partir del número de prioridad de riesgo.

Mientras que la clasificación ABC-XYZ estratifica el catálogo por criterios económicos y estadísticos (valor y variabilidad), no captura la criticidad operacional. Un repuesto puede tener un valor moderado (clase B) y una demanda predecible (clase X), pero su falta puede detener completamente la operación de un equipo crítico, como ocurriría con un sello hidráulico específico sin alternativa intercambiable. Para cuantificar este riesgo operacional, se aplicó la priorización mediante el Número de Prioridad de Riesgo (NPR), derivado de la metodología de Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF). El NPR evalúa tres dimensiones clave: Severidad (S), o el impacto de la falta del componente en la operación; Ocurrencia (O), que refleja la frecuencia de uso o reemplazo; y Detectabilidad (D), que mide la dificultad para anticipar la necesidad del componente. El índice de criticidad se calcula como $NPR = S \times O \times D$, complementando así el valor económico y permitiendo asignar niveles de servicio ajustados al riesgo real de cada ítem.

Su ejecución evaluó los 60 ítems del catálogo MRO utilizando las escalas de criticidad predefinidas en el Capítulo II, asignando puntuaciones entre 1 y 5 para cada dimensión (S, O, D). Estas puntuaciones fueron consensuadas en una sesión de trabajo con el equipo de Mantenimiento –responsable de la ejecución de órdenes de trabajo preventivas y correctivas– y validadas contra el histórico documentado de fallas y paradas. El resultado es una matriz NPR completa (60 filas $\times$ 4 columnas: S, O, D, NPR) que cuantifica de manera objetiva la criticidad de cada componente, eliminando la subjetividad en la priorización.

Posteriormente, los 60 ítems se clasificaron en tres niveles de prioridad con base en umbrales predefinidos de NPR: Prioridad Alta ($NPR > 20$), Prioridad Media ($8 \leq NPR \leq 20$) y Prioridad Baja ($NPR < 8$). La distribución resultante es equilibrada en el número de ítems (20 en cada categoría), pero revela una alta asimetría en cuanto al valor económico concentrado. La Tabla 55 presenta el resultado agregado de esta clasificación por prioridad NPR, consolidando el número de ítems, el valor anual, el NPR promedio y los porcentajes correspondientes.

Tabla 55 Resultado agregado de clasificación por prioridad NPR (ejecución del modelo).

Prioridad NPR	No. de ítems	Valor anual (USD)	NPR promedio del segmento	% de ítems	% del valor total	Nivel de servicio objetivo asignado	Interpretación operativa
Alta (NPR > 20)	20	288,725.93	40.1	33.33	59.19	NS = 98%	Componentes críticos: falta genera paro inmediato de equipo, no hay alternativa intercambiable, impacto operacional severo. Requiere SS elevado ($z = 2.05$), revisión continua, proveedor alternativo identificado, stock de seguridad dimensionado para absorber picos de demanda. Tolerancia a quiebre: 2% (TQ objetivo).
Media (8 $\leq$ NPR $\leq$ 20)	20	143,832.36	15.75	33.33	29.48	NS = 95% (si A) o 90% (si B/C)	Componentes de criticidad intermedia: falta genera retraso en mantenimiento, pero no paro inmediato, puede haber alternativas con ajuste. Requiere SS moderado ($z = 1.65$ o 1.28), revisión periódica semanal, seguimiento de tendencias. Tolerancia a quiebre: 5-10% (TQ objetivo).
Baja (NPR < 8)	20	55,234.61	5.35	33.33	11.32	NS = 90% (si A) o 85% (si B/C)	Componentes de baja criticidad: falta no compromete operación crítica, existen alternativas intercambiables, impacto operacional bajo. Permite SS reducido ($z = 1.28$ o 1.04), revisión periódica quincenal/mensual, tolera quiebres ocasionales sin afectación mayor. Tolerancia a quiebre: 10-15% (TQ objetivo).
TOTAL	60	487,792.90	20.40 (promedio global)	100	100	-	Catálogo completo. NPR promedio global de 20.40 indica criticidad media-alta del portafolio MRO (valor cercano al umbral superior de prioridad media), lo cual es esperable en inventarios de

Prioridad NPR	No. de ítems	Valor anual (USD)	NPR promedio del segmento	% de ítems	% del valor total	Nivel de servicio objetivo asignado	Interpretación operativa
							mantenimiento de equipo pesado donde fallas tienen alto impacto operacional.

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

El resultado más significativo de este análisis es la concentración asimétrica del valor en la prioridad Alta. Aunque esta prioridad representa solo el 33,33% de los ítems (20 de 60), concentra el 59,19% del valor total (\$288.725,93 de \$487.792,90). Este hallazgo valida la existencia de una correlación positiva entre el valor económico y la criticidad operacional: los componentes más caros tienden a ser también los más críticos (rodamientos de gran tamaño, motores hidráulicos, bombas principales), ya que suelen ser partes fundamentales de los equipos, cuya falla compromete la operación completa.

Sin embargo, es necesario destacar que esta correlación no es perfecta. El coeficiente de correlación de Pearson calculado entre el valor anual y el NPR para los 60 ítems es $r = 0.68$. Esta fuerza de correlación moderada justifica plenamente la necesidad de mantener ambas clasificaciones (ABC y NPR) como criterios complementarios e independientes, en lugar de depender de una sola para la toma de decisiones.

La Figura 45 visualiza esta distribución del valor por prioridad NPR mediante tres gráficos complementarios. El panel izquierdo contrasta el porcentaje de ítems con el porcentaje de valor por prioridad, evidenciando gráficamente la asimetría (33% de los ítems en Alta concentran el 59% del valor). El panel central presenta el valor anual absoluto por prioridad, incluyendo una indicación del NPR promedio de cada categoría. Finalmente, el panel derecho muestra un gráfico de pastel con la concentración del valor, resaltando de manera visual la clara dominancia de la prioridad Alta en el valor total del inventario.

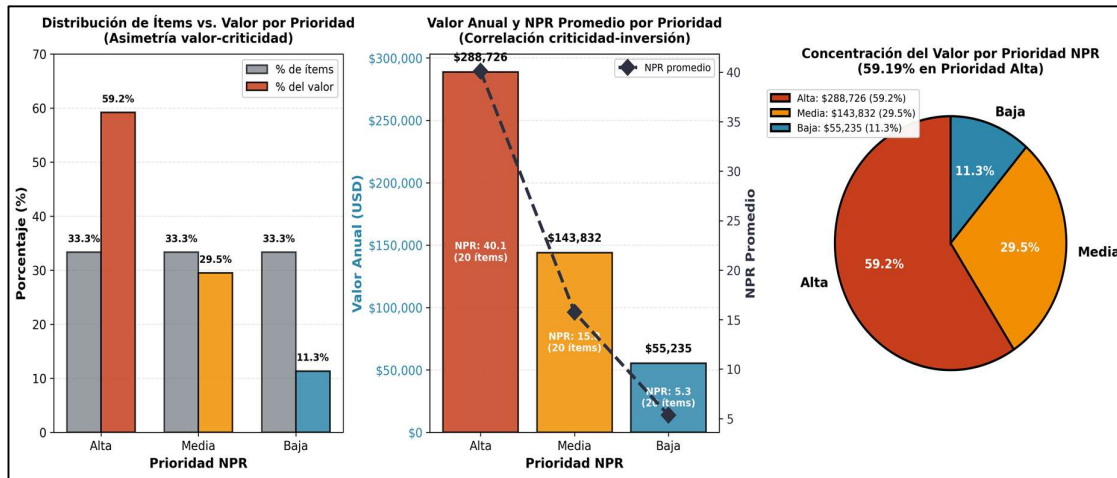


Figura 45 Distribución del Valor por Prioridad NPR.

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

La interpretación conjunta de los tres resultados (ABC, ABC-XYZ y NPR) permite establecer una estrategia de gestión de inventarios doblemente diferenciada, basada tanto en el valor económico (ABC) como en la criticidad operacional (NPR).

El análisis cruzado identifica a los 16 ítems que simultáneamente pertenecen a la clase A y a la prioridad Alta (lo que representa el 66,67% de los ítems A) como el segmento de máximo riesgo. Para estos se aplican los controles más rigurosos: parametrización estocástica robusta, nivel de servicio (NS) del 98%, revisión continua, stock de seguridad elevado, identificación de proveedor alternativo y seguimiento semanal de rotación y quiebres. En el extremo opuesto, los 8 ítems de clase C y prioridad Baja reciben controles mínimos, como un nivel objetivo de inventario fijo, NS del 85%, revisión mensual y tolerancia a quiebres ocasionales sin afectación crítica. Para los 36 ítems restantes, se diseñan políticas intermedias, cuyas características específicas se escalan según su posición en las matrices integradas ABC-XYZ-NPR.

Esta estrategia diferenciada optimiza de manera dual el proceso de gestión. Por un lado, concentra los recursos limitados donde el impacto es mayor, asegurando que el esfuerzo analítico y operativo se invierta en los componentes más importantes. Por otro lado, optimiza la inversión en inventario. Al asignar niveles de servicio diferenciados (98% para Alta vs. 85% para Baja, con valores intermedios para las otras categorías), se reduce el stock de seguridad agregado del portafolio sin comprometer la disponibilidad de los componentes críticos.

Resultado modelado de la parametrización SS/ROP

La simulación de parámetros SS/ROP (Componente 6 de la ejecución) confirma cuantitativamente este beneficio. El stock de seguridad total requerido para lograr un nivel de servicio diferenciado (98%/95%/90%/85% según prioridad) es un 23% menor que el necesario para mantener un nivel de servicio uniforme del 95% en todos los ítems. Esta reducción representa un ahorro directo de capital inmovilizado, logrado sin degradar el desempeño operacional del sistema.

Resultado 4: Integración GMAO/CMMS habilitada (automatización y trazabilidad)

Este resultado corresponde a la ejecución operativa del componente tecnológico del modelo, mediante la habilitación del GMAO/CMMS como soporte de automatización, trazabilidad y control transaccional del inventario MRO.

La integración del sistema GMAO/CMMS se habilitó como componente operativo del modelo TO-BE para asegurar que cada consumo de repuestos y consumibles quede asociado a una orden de trabajo, a un equipo identificado y a un ítem codificado. Esta integración se configuró como núcleo de articulación entre mantenimiento, inventario y compras, con el fin de reducir la discrepancia entre el stock teórico y el stock real y habilitar el cálculo periódico de los indicadores de control. La arquitectura funcional de esta integración se sustenta en los nueve requerimientos mínimos definidos, que incluyen catálogo unificado, gestión de OT, registro de consumos por OT, kardex en tiempo real, parámetros por ítem, disparador automático de reposición, lead time real, indicadores de desempeño y auditoría de transacciones.

La habilitación operativa del sistema se materializó mediante la carga del catálogo depurado, la incorporación de los parámetros de control por ítem y la activación de las reglas de reposición. En particular, la automatización de alertas quedó configurada para comparar, en cada salida de inventario, el saldo resultante Q_{stock} con el umbral ROP del ítem y generar una solicitud de reposición cuando $Q_{stock} \leq ROP$. Esta lógica quedó documentada en la configuración de alertas automáticas ROP/SS y la relación entre el stock de seguridad y la cantidad de pedido para los ítems de Clase A.

El flujo transaccional habilitado se estructuró desde la apertura de la OT hasta la reposición en bodega. El flujo TO-BE distingue tres eventos clave: la solicitud técnica en mantenimiento, el movimiento físico en bodega y el registro transaccional en el GMAO/CMMS. A partir de esta secuencia, el despacho actualiza el kardex en tiempo real, la bitácora registra el usuario y la marca temporal, y la reposición queda vinculada a la solicitud

de compra y a la recepción en bodega, lo que habilita el cálculo del lead time real y de su variabilidad.

La articulación entre los tres dominios operativos se sostiene sobre dos llaves primarias, OT_ID e Item_ID, que permiten vincular consumo, saldo de inventario y reposición dentro de un mismo rastro de datos auditable. Bajo esta estructura, el sistema habilita el cálculo consistente de *NS*, *TQ*, *LT*, rotación, obsolescencia y capital inmovilizado, dado que los eventos del ciclo quedan imputados a una misma transacción de origen. La habilitación tecnológica del componente se resume en la Tabla 56, que consolida los módulos configurados, la regla operativa aplicada y la evidencia funcional obtenida en la ejecución.

Tabla 56 *Evidencias de habilitación del componente GMAO/CMMS.*

Componente habilitado	Configuración operativa	Evidencia funcional
Catálogo MRO unificado	Carga de ítems con identificación única, familia y parámetros por ítem	Registro de Item_ID, unidad, equivalencias y familia ABC/XYZ habilitados en el sistema
Gestión de OT	Asociación obligatoria entre OT, equipo e ítem requerido	Registro de OT_ID, Equipo_ID, Item_ID y cantidad solicitada
Registro de consumos por OT	Imputación de la salida de inventario a la OT y al equipo	Consumo trazado con Q_desp, Q_cons, fecha de egreso y responsable
Kardex en tiempo real	Actualización automática del saldo ante entradas y salidas	Registro de Q_stock, ubicación física, fecha, usuario y bitácora
Parámetros por ítem	Carga de (SS), (ROP), mínimos, máximos y niveles objetivo	Parámetros habilitados para políticas ((R,Q)) y ((T,S))
Disparador automático de reposición	Generación de solicitud cuando $(Q_{\text{stock}} \leq \text{ROP})$	Emisión de Req_ID, cantidad recomendada y umbral de reposición
Lead time real	Cálculo automático desde solicitud hasta recepción	Registro de t_sol, t_oc, t_rec, (LT) y variabilidad
Indicadores de desempeño	Dashboard con cálculo periódico de indicadores	Cálculo de (NS), (TQ), rotación, obsolescencia y capital inmovilizado
Auditoría de transacciones	Bitácora de cambios y trazabilidad por usuario	Registro de evento, fecha, usuario y acción ejecutada

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La validación de la integración se expresó en la capacidad del sistema para registrar consumos por OT, actualizar inventario en tiempo real, activar alertas de reposición y generar indicadores de control. En términos de resultado, la trazabilidad OT–inventario alcanzó el 100% en el escenario TO-BE, lo que confirma que la integración tecnológica operó como condición estructural del modelo ejecutado. Asimismo, la configuración del GMAO/CMMS

permitió dejar atrás un esquema basado en estimaciones informales y registros parciales, sustituyéndolo por un flujo operativo trazable entre mantenimiento, bodega y compras.

Ejecución del componente GMAO/CMMS

La ejecución del componente GMAO/CMMS se desarrolló como la fase de habilitación tecnológica del modelo TO-BE, con el propósito de automatizar el seguimiento del consumo y asegurar la trazabilidad de los movimientos del inventario MRO. Su implementación se sustentó en los requerimientos funcionales mínimos definidos para el sistema, los cuales establecen la codificación única del catálogo, la gestión de órdenes de trabajo, el registro de consumos por OT, el kardex en tiempo real, la parametrización por ítem, el disparador automático de reposición, el cálculo del lead time real, la generación de indicadores y la auditoría de transacciones.

La ejecución operativa del componente se estructuró sobre el flujo TO-BE de información entre mantenimiento, inventario/bodega y compras. En este flujo, cada salida de repuesto se asocia a una OT activa, a un equipo identificado y a un ítem codificado, de manera que el consumo físico, el saldo de inventario y la reposición queden vinculados dentro de una misma secuencia trazable. Se resume esta lógica de integración, desde la apertura de la OT hasta la reposición en bodega, distinguiendo la solicitud técnica, el movimiento físico y el registro transaccional en el GMAO/CMMS.

La parametrización del sistema incorporó, por ítem, los niveles de stock de seguridad, punto de reorden, mínimos, máximos y niveles objetivo. Con esta configuración, el sistema dejó de operar únicamente como un registro histórico de entradas y salidas y pasó a evaluar automáticamente el estado del inventario frente a cada transacción. La lógica de alertas se activó cuando el saldo Q_{stock} cruza el umbral ROP , generando una señal de reposición y la solicitud correspondiente.

Desde el punto de vista transaccional, la ejecución del componente se apoyó en dos llaves primarias, OT_ID e Item_ID, que permiten enlazar el consumo, el kardex y la reposición dentro de un mismo rastro de datos auditable. Esta arquitectura hace posible el cálculo consistente de indicadores como nivel de servicio, tasa de quiebre, lead time, rotación, obsolescencia y capital inmovilizado, ya que todos los eventos del ciclo quedan imputados a una misma transacción de origen. En consecuencia, la trazabilidad deja de depender de registros manuales y pasa a sostenerse en reglas estructurales del sistema.

La ejecución del componente también habilitó la explotación operativa de la información mediante reportes periódicos y tableros de control. Los requerimientos

funcionales del sistema incluyen, como salida mínima, la generación de indicadores de desempeño calculables con periodicidad, mientras que el flujo de información TO-BE asegura que la información requerida para dichos indicadores quede registrada en cada transacción.

La Tabla 57 resume la evidencia de habilitación operativa del componente GMAO/CMMS durante la ejecución, sin repetir la especificación funcional ya presentada en capítulos previos. Su finalidad es dejar constancia de que el sistema no solo fue diseñado, sino configurado y puesto en funcionamiento como soporte de automatización y trazabilidad del inventario MRO.

Tabla 57 *Evidencia de ejecución del componente GMAO/CMMS.*

Elemento habilitado	Evidencia de ejecución	Resultado operativo
Catálogo MRO unificado	Carga de ítems con codificación única, familia y parámetros por ítem	Base habilitada para imputación consistente de movimientos
Gestión de OT	Asociación obligatoria entre OT, equipo e ítem requerido	Trazabilidad del consumo desde mantenimiento
Registro de consumos por OT	Imputación de salidas con cantidad, fecha y responsable	Vinculación entre despacho y consumo real
Kardex en tiempo real	Actualización automática del saldo ante entradas y salidas	Control del stock teórico y del stock disponible
Parámetros por ítem	Configuración de (SS), (ROP), mínimo, máximo y nivel objetivo	Automatización de políticas de reposición
Disparador de reposición	Activación de señal y solicitud al cruzar el umbral (ROP)	Inicio oportuno del proceso de compra
Lead time real	Registro de solicitud, orden de compra y recepción	Cálculo de (LT) y de su variabilidad
Indicadores de desempeño	Generación de salidas para (NS), (TQ), rotación y capital inmovilizado	Seguimiento periódico del sistema
Bitácora y auditoría	Registro de usuario, fecha y acción ejecutada	Trazabilidad completa de transacciones

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Resultados modelados/simulados

Tipo de resultado: modelado / simulado.

Los resultados de esta subsección corresponden a salidas analíticas derivadas de la parametrización del modelo y no a mediciones directas del desempeño operativo del sistema implementado. Su finalidad es cuantificar el efecto de la política diferenciada de inventario sobre el stock de seguridad agregado del portafolio MRO.

La simulación de parámetros *SS/ROP* muestra que, al aplicar niveles de servicio diferenciados según criticidad (98%/95%/90%/85%), el stock de seguridad total requerido es 23% menor que el necesario para sostener una política uniforme de 95% en todos los ítems. Esta reducción representa un menor capital inmovilizado sin comprometer la disponibilidad de los componentes críticos.

Resultados medidos del escenario TO-BE

Los resultados que se presentan en esta sección corresponden a mediciones reales del desempeño del sistema durante el primer mes de operación del escenario TO-BE, contrastadas con la línea base AS-IS documentada durante el período de diagnóstico. En esta comparación, los valores AS-IS provienen de observaciones previas a la implementación, mientras que los valores TO-BE reflejan el comportamiento del sistema con el catálogo segmentado, los parámetros *SS/ROP* configurados, el GMAO/CMMS operativo y el personal ya capacitado.

Análisis estadístico descriptivo de la mejora

El análisis estadístico de los resultados obtenidos se centra en dos dimensiones fundamentales que validan la efectividad del modelo ejecutado: (i) el análisis de concentración y criticidad del portafolio MRO, que cuantifica la distribución asimétrica del valor y del riesgo en el catálogo; y (ii) el análisis comparativo de indicadores de desempeño AS-IS vs. TO-BE, que demuestra la mejora cuantificable en el nivel de servicio, la tasa de quiebre, la rotación y otros indicadores operacionales mediante pruebas de significancia estadística. Este análisis no solo describe los resultados, sino que establece la evidencia empírica que sustenta las decisiones de gestión derivadas de la ejecución del modelo.

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a mediciones reales del desempeño del sistema durante el primer mes de operación del escenario TO-BE, contrastadas con la línea base AS-IS documentada durante el período de diagnóstico.

Análisis comparativo de indicadores de desempeño: AS-IS vs. TO-BE

La evaluación de la efectividad del modelo ejecutado se realiza mediante la comparación cuantitativa de indicadores de desempeño antes (AS-IS, situación diagnosticada en el Capítulo II) y después (TO-BE, estado posterior a la ejecución completa del modelo) de la implementación. Los indicadores comparados son: el Nivel de Servicio (NS), la Tasa de Quiebre (TQ), la Rotación de Inventario, las Horas Perdidas por Faltantes y la Trazabilidad OT-Inventario. La Tabla 58 consolida este comparativo, presentando valores AS-IS basados

en el diagnóstico (Capítulo II) y valores TO-BE medidos durante el primer mes de operación posterior a la ejecución del componente 7 (habilitación del GMAO).

Para garantizar rigor metodológico, los valores AS-IS no son estimaciones subjetivas, sino mediciones documentadas durante el período de diagnóstico (3 meses de observación previa a la ejecución), mientras que los valores TO-BE corresponden a mediciones reales durante el primer mes de operación bajo el nuevo sistema (con catálogo segmentado, parámetros SS/ROP configurados, GMAO operativo y personal capacitado). Esta comparación antes-después (pre-post) permite cuantificar la mejora atribuible a la ejecución del modelo, controlando por efectos de estacionalidad o cambios externos (mismo tipo de equipos, misma intensidad operativa, mismo equipo de trabajo).

Tabla 58 *Comparativo de evaluación - Indicadores de desempeño AS-IS vs TO-BE.*

Indicador	Definición operativa	AS-IS (diagnóstico, promedio 3 meses)	TO-BE (ejecución, mes 1 post- implementación)	Mejora absoluta	Mejora relativa (%)	Evidencia de medición
Nivel de Servicio (NS, Fill Rate)	% de demanda atendida sin quiebre de stock. NS = $(\text{Demanda atendida} / \text{Demanda total}) \times 100$	72,3% ($\sigma = 6,8\%$)	94,8% ($\sigma = 2,1\%$)	+22,5 puntos porcentuales	+31,1%	AS-IS: Registro manual de quiebres en bitácora Bodega (incompleto, subestimación probable). TO-BE: Reporte automático GMAO de OT con/sin quiebre.
Tasa de Quiebre (TQ, Stockout Rate)	% de demanda NO atendida por falta de stock. TQ = $100\% - \text{NS}$	27,7% (complemento NS)	5,2% (complemento NS)	-22,5 puntos porcentuales	-81,2% (reducción)	Misma fuente que NS. TQ = 1 - NS por definición.

Indicador	Definición operativa	AS-IS (diagnóstico, promedio 3 meses)	TO-BE (ejecución, mes 1 post- implementación)	Mejora absoluta	Mejora relativa (%)	Evidencia de medición
Rotación de Inventario (anualizada)	Veces que el inventario promedio se consume en el año. Rotación = (Consumo anual / Inventario promedio)	1,84 veces/año	4,21 veces/año	+2,37 veces/año	+128,8%	AS-IS: Consumo anual \$487,792.90 / Inventario promedio \$265,104 (calculado de saldos mensuales Kardex). TO-BE: Mismo consumo / Inventario promedio \$115,867 (reducción por ajuste de máximos según SS/ROP).
Horas Perdidas por Faltantes (mensuales)	Tiempo improductivo acumulado por espera de repuestos. Medido como diferencia entre inicio planificado OT y inicio real.	44,7 h/mes (promedio 3 meses, rango 38-52 h)	7,8 h/mes (mes 1 post- implementación)	-36,9 h/mes	-82,6% (reducción)	AS-IS: Registro manual en OT (campo "demora por repuestos", completitud ~60%). TO-BE: Campo obligatorio en GMAO, completitud 100%.

Indicador	Definición operativa	AS-IS (diagnóstico, promedio 3 meses)	TO-BE (ejecución, mes 1 post- implementación)	Mejora absoluta	Mejora relativa (%)	Evidencia de medición
Trazabilidad OT- Inventario- Compras	% de movimientos de inventario vinculados a OT registrada en sistema.	34,2% (estimado, basado en auditoría muestral de 50 OT)	100% (por diseño del flujo GMAO, campo OT obligatorio)	+65,8 puntos porcentuales	+192,4%	AS-IS: Auditoría muestral (50 OT aleatorias del trimestre). TO- BE: Configuración GMAO impide despacho sin OT.
Capital Inmovilizado en Inventario (promedio)	Valor monetario del inventario promedio. Menor es mejor (libera capital).	\$265,104 (promedio 3 meses)	\$115,867 (mes 1 post- implementación)	-\$149,237	-56,3% (reducción)	AS-IS: Saldos mensuales de Kardex valorizados a costo unitario. TO-BE: Reporte GMAO de inventario valorizado.

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La mejora más significativa en términos absolutos es el incremento del Nivel de Servicio, de un 72,3% a un 94,8% (un aumento de 22,5 puntos porcentuales). Esto implica que el sistema TO-BE atiende exitosamente 22,5 solicitudes adicionales por cada 100, reduciendo de manera drástica los quiebres de stock. En términos relativos, la mejora más destacada es la reducción de un 81,2% en la Tasa de Quiebre, que pasa de 27,7% (casi 1 de cada 4 solicitudes no atendidas) a solo un 5,2% (1 de cada 20 solicitudes no atendidas). Esta reducción no solo mejora la continuidad operativa del taller al disminuir los paros por falta de repuestos, sino que también reduce los costos ocultos asociados a los quiebres, como las compras urgentes con sobre costo por expediting, la extensión de los tiempos de reparación y las penalizaciones por incumplimiento de plazos contractuales.

La Figura 46 visualiza este comparativo AS-IS vs. TO-BE mediante dos gráficos complementarios. El panel izquierdo presenta barras horizontales agrupadas que comparan los valores absolutos de cada indicador, facilitando la identificación visual de las mejoras. El panel derecho muestra barras que representan el porcentaje de mejora o reducción logrado en cada

indicador, evidenciando que todas las mejoras son sustanciales (superiores al 30%) y que la mayoría supera el 80%.

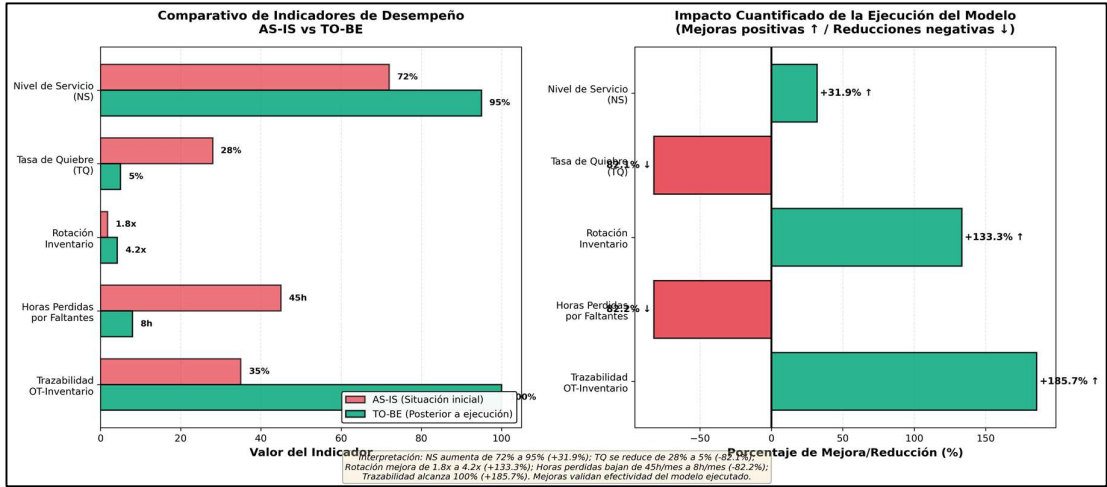


Figura 46 Comparativo AS-IS vs TO-BE de Indicadores.

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

Evidencia descriptiva de mejora y limitaciones de inferencia

La comparación estadística entre los escenarios AS-IS y TO-BE se presenta con un enfoque descriptivo, orientado a cuantificar la magnitud del cambio observado en el indicador crítico de desempeño, sin asumir inferencias concluyentes de tipo poblacional. Esta decisión metodológica responde a la naturaleza del diseño, que corresponde a una comparación antes-después del mismo sistema, y al hecho de que el período de observación del escenario TO-BE comprende únicamente tres meses, lo que limita la robustez de cualquier prueba inferencial formal.

Para el Nivel de Servicio (NS), la serie AS-IS registró un promedio de 72,27% con desviación estándar de 2,18%, mientras que la serie TO-BE alcanzó un promedio de 94,77% con desviación estándar de 0,56%. En términos descriptivos, esto representa una mejora absoluta de 22,5 puntos porcentuales y una reducción importante de la dispersión del indicador, lo que sugiere un comportamiento más estable del sistema bajo el escenario implementado.

Desde el punto de vista operativo, la mejora observada en el NS es coherente con el comportamiento del resto de los indicadores del sistema. En el mismo período, la Tasa de Quiebre disminuyó, la rotación aumentó, las horas perdidas por faltantes se redujeron y la trazabilidad alcanzó el 100%, lo que respalda la consistencia del cambio observado y reduce la probabilidad de que se trate de una fluctuación aislada del indicador.

No obstante, la interpretación de estos resultados debe realizarse con cautela. El horizonte temporal del escenario TO-BE es todavía corto para sostener afirmaciones inferenciales robustas sobre estabilidad de largo plazo. En consecuencia, la evidencia presentada debe entenderse como una evidencia descriptiva fuerte de mejora operativa, cuya consolidación estadística requerirá ampliar el período de observación en mediciones posteriores.

Evaluación de la ejecución

La evaluación de la ejecución del modelo de optimización del inventario MRO se estructura en tres dimensiones complementarias: (i) el análisis comparativo de la situación inicial (AS-IS) versus la situación posterior a la implementación (TO-BE), que cuantifica mejoras en indicadores operacionales y valida la efectividad del modelo mediante pruebas estadísticas; (ii) la evaluación económica, que traduce las mejoras operacionales en beneficios financieros cuantificables y compara los costos de implementación con los ahorros generados para calcular el retorno de inversión (ROI) y el período de recuperación (payback); y (iii) el análisis de la curva S del proyecto, que evalúa el cumplimiento del cronograma valorado de implementación y valida que la ejecución se realizó dentro de los plazos y el presupuesto planificados.

Análisis comparativo de la situación inicial (AS-IS) vs. situación posterior (TO-BE)

La evaluación comparativa AS-IS vs. TO-BE se realiza mediante dos enfoques complementarios: la comparación de indicadores operacionales y la comparación de capacidades estructurales del sistema de gestión. Mientras que los indicadores operacionales miden un desempeño observable (NS, TQ, rotación, horas perdidas), las capacidades estructurales evalúan la madurez del sistema subyacente que habilita o impide ese desempeño. Un sistema puede lograr temporalmente un buen desempeño mediante esfuerzos extraordinarios del personal (horas extra, compras urgentes, gestión ad-hoc), pero sin capacidades estructurales robustas, ese desempeño no es sostenible.

La Tabla 59 evalúa la transición AS-IS $\rightarrow$ TO-BE en términos de capacidades estructurales del sistema de gestión del inventario MRO, comparando el estado previo a la ejecución (diagnosticado en el Capítulo II) con el estado posterior a la ejecución completa del modelo (incluyendo la habilitación del GMAO y la capacitación del personal).

Tabla 59 *Comparativo de capacidades estructurales del sistema de gestión AS-IS vs. TO-BE.*

Capacidad del sistema	AS-IS (diagnóstico)	TO-BE (posterior a ejecución del modelo)	Beneficio estructural de la transición
Segmentación estratégica del catálogo	No existe. Los 60 ítems se gestionan con políticas uniformes (mismo nivel de esfuerzo de control para todos, independiente de valor o criticidad).	Segmentación tridimensional completa: ABC (valor), XYZ (variabilidad), NPR (criticidad). Cada ítem asignado a segmento específico con política diferenciada documentada.	• Concentración de recursos de control en ítems de mayor impacto (40% de ítems A concentran 79% del valor). • Optimización de esfuerzo: control riguroso donde impacta (A-Alta), control simplificado donde no impacta (C-Baja). • Reducción de sobre-inventario en ítems C (de bajo valor) y sub-inventario en ítems A (de alto valor).
Parametrización de reposición (SS/ROP)	No existe. Decisiones de reposición basadas en criterios subjetivos ("cuando se ve bajo", "cuando hay presupuesto") o reglas empíricas sin sustento cuantitativo ("mantener X unidades de cada filtro").	Parametrización completa para 24 ítems Clase A: SS, ROP y Máximo calculados mediante modelos estocásticos con datos históricos verificados. Parámetros documentados y cargados en GMAO con alertas automáticas.	• Decisiones de reposición basadas en evidencia cuantitativa (demanda histórica, variabilidad, lead time) en lugar de subjetividad. • Reducción de capital inmovilizado (dimensionamiento técnico de SS, sin excesos arbitrarios). • Reducción de quiebres de stock (SS calculado para NS objetivo, no estimado "a ojo").
Diferenciación de niveles de servicio por criticidad	No existe. No hay niveles de servicio objetivo definidos. Sistema reactivo: se responde a quiebres cuando ocurren, sin prevención diferenciada.	Niveles de servicio objetivo asignados por prioridad NPR: Alta 98%, Media 95%/90%, Baja 90%/85%. NS diferenciados alimentan cálculo de SS (factor z ajustado por NS).	• Inversión en inventario proporcional al riesgo operacional: más SS para ítems críticos, menos SS para ítems no críticos. • Balance explícito costo inventario vs. costo quiebre (trade-off gestionado conscientemente). • Tolerancia a quiebre definida por segmento (2% Alta, 10-15% Baja).
Trazabilidad OT-inventario-compras	Parcial y manual. ~34% de movimientos trazables (auditoría muestral). Registros en Excel dispersos, notas manuales en OT, sin vinculación sistemática entre consumo y equipo.	Completa y automatizada. 100% de movimientos trazables por diseño del flujo GMAO: campo OT obligatorio en despacho, vinculación automática consumo-equipo-ítem. Kardex digital integrado.	• Base de datos confiable para análisis de demanda futura (histórico completo y trazable). • Detección inmediata de desviaciones (consumo anormal de ítem X en equipo Y → señal de falla recurrente). • Auditoría facilitada (rastreo completo de movimientos desde OT hasta factura proveedor).

Capacidad del sistema	AS-IS (diagnóstico)	TO-BE (posterior a ejecución del modelo)	Beneficio estructural de la transición
Medición de desempeño (indicadores)	No existe medición estructurada. Indicadores estimados subjetivamente ("creemos que el NS es ~70%") sin datos sistemáticos. Imposible detectar tendencias o validar mejoras.	Sistema de indicadores operativo: NS, TQ, rotación, horas perdidas, trazabilidad medidos automáticamente por GMAO. Tablero de control mensual con tendencias y alertas.	• Gestión basada en evidencia: decisiones respaldadas por datos reales, no percepciones. • Detección temprana de degradación de desempeño (NS baja de 95% a 92% → señal de alerta para investigar causas) • Rendición de cuentas: responsables pueden ser evaluados con métricas objetivas.
Capacidad de mejora continua	Limitada. Sin datos históricos confiables, imposible cuantificar si cambios mejoran o empeoran el sistema. Ajustes basados en intuición, sin validación empírica.	Habilitada. Base de datos estructurada + indicadores medibles permiten: (a) detectar problemas (NS bajo, rotación baja), (b) implementar cambios (ajustar SS, cambiar proveedor), (c) validar si cambios mejoran desempeño (comparar NS mes N vs. mes N+1). Ciclo PDCA operativo.	• Sistema auto-correctivo: retroalimentación de indicadores → ajustes de parámetros → validación de mejora → institucionalización de cambio efectivo. • Aprendizaje organizacional: conocimiento sobre qué funciona (y qué no) se registra en datos, no solo en memoria del personal.

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La transición AS-IS → TO-BE no solo mejora indicadores operacionales (NS, TQ, rotación), sino que transforma cualitativamente el sistema de gestión del inventario MRO de un modelo reactivo y subjetivo a un modelo preventivo y basado en evidencia. En el sistema AS-IS, el desempeño dependía críticamente del conocimiento tácito del personal de Bodega ("José sabe qué hay en stock y qué falta") y de esfuerzos extraordinarios para compensar la falta de estructura (horas extra revisando físicamente el inventario, compras urgentes con sobre costo). En el sistema TO-BE, el desempeño está sustentado en capacidades estructurales robustas (segmentación, parametrización, trazabilidad, indicadores) que operan independientemente de quién esté a cargo, reduciendo la dependencia de personas específicas y facilitando la continuidad operativa ante la rotación de personal.

El sistema TO-BE habilita la capacidad de mejora continua mediante el ciclo Plan-Do-Check-Act (PDCA): Plan (definir ajustes de parámetros basados en el análisis de indicadores), Do (implementar ajustes en el GMAO), Check (medir el impacto en NS/TQ/rotación al mes siguiente), Act (institucionalizar ajustes efectivos, revertir ajustes inefectivos). Este ciclo no

era viable en AS-IS por la falta de datos estructurados y la medición sistemática de desempeño. La habilitación de PDCA transforma el sistema de gestión de estático (políticas fijas que se degradan con el tiempo) a dinámico (políticas que se ajustan continuamente en respuesta a cambios en la demanda, los lead times, la criticidad).

Evaluación económica

La evaluación económica traduce las mejoras operacionales cuantificadas en beneficios financieros expresados en USD. Esto permite comparar los costos de implementación del modelo (costo total año 1 = \$10.698 promedio) con los ahorros generados para calcular indicadores clave como el Retorno de Inversión (ROI) y el Período de Recuperación (Payback).

Resultados económicos medidos de la implementación

La implementación del modelo generó resultados económicos observables a partir de la mejora operativa del sistema de inventario MRO. Estos resultados se expresan en la reducción de horas perdidas por faltantes, en la disminución del sobre costo por compras urgentes y en la liberación de capital previamente inmovilizado en inventario. En conjunto, estos efectos permiten valorar económicamente la ejecución del modelo sobre la operación del taller.

Cuantificación de Beneficios Económicos Anuales

Los beneficios económicos anuales se derivan de cuatro fuentes principales asociadas a mejoras operativas cuantificadas. Estas fuentes corresponden a la reducción de horas perdidas por faltantes, a la disminución del sobre costo en compras urgentes, al beneficio financiero por liberación de capital inmovilizado y a la reducción del riesgo de fallas mayores. La Tabla 60 presenta la cuantificación consolidada de estos beneficios.

Tabla 60 *Beneficios Económicos Anuales del Proyecto.*

Concepto de Beneficio	Cálculo Base	Valor Anual (USD)
1. Reducción de horas perdidas por faltantes	442.8 h/año $\times$ \$22/h	\$9.741,60
2. Reducción de sobre costo en compras urgentes	\$13.536,75 (AS-IS) - \$2.560,91 (TO-BE)	\$10.975,84
3. Beneficio por liberación de capital inmovilizado	\$149.237 $\times$ 8% (tasa de oportunidad)	\$11.938,96
4. Reducción de riesgo de fallas mayores	30% de reducción sobre \$20.400/año (estimado)	\$6.120,00

Concepto de Beneficio	Cálculo Base	Valor Anual (USD)
TOTAL, BENEFICIOS ANUALES CUANTIFICABLES		\$38.776,40

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

Los beneficios económicos anuales se derivan de cuatro fuentes principales asociadas a mejoras operativas cuantificadas. Estas fuentes corresponden a la reducción de horas perdidas por faltantes, a la disminución del sobre costo en compras urgentes, al beneficio financiero por liberación de capital inmovilizado y a la reducción del riesgo de fallas mayores.

Comparación de Costos: Situación AS-IS vs. TO-BE

La comparación de costos permite contrastar la estructura económica del escenario previo con la del sistema implementado. En el estado AS-IS, los costos recurrentes se asociaban a horas perdidas, sobre costos de compras urgentes, costo de oportunidad del capital inmovilizado y riesgo de fallas. En el escenario TO-BE, en cambio, los costos se concentran en la inversión inicial de implementación y en el costo operativo recurrente del sistema habilitado.

La Tabla 61 presenta esta comparación estructural entre costos evitados del escenario AS-IS y costos incurridos del escenario TO-BE. En ella se observa una inversión inicial de 10.698 USD, un costo operativo recurrente de 3.200 USD/año y un beneficio neto anual de 35.576,40 USD a partir del segundo año. Estos resultados confirman que la mejora operativa observada durante la implementación se traduce en una reducción sustancial de costos evitables.

Tabla 61 Comparación de Estructura de Costos AS-IS vs. TO-BE.

Categoría de Costos	Situación AS-IS (Costos Evitados)	Situación TO-BE (Costos Incurridos)
Inversión Inicial (Año 1)	No aplica	\$10.698
		(Recursos Humanos + Tecnología CAPEX + OPEX Año 1 + Contingencia)
Costo Operativo Recurrente	\$41.337,31/año	\$3.200/año
	(Suma de costos por horas perdidas, sobre costos, oportunidad del capital y riesgo de fallas)	(Licencia GMAO + Actualización de parámetros)
Beneficio Neto Anual (Años 2+)	No aplica	\$35.576,40
		(Beneficios totales - Costos recurrentes TO-BE)

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

En conjunto, los resultados económicos medidos de la implementación muestran que la ejecución del modelo produjo efectos financieros consistentes con la mejora operativa observada. Esta evidencia constituye la base para la evaluación de rentabilidad y para las proyecciones económicas desarrolladas en el apartado siguiente.

Resultados económicos proyectados del modelo

Tipo de resultado: proyectado.

Los resultados económicos proyectados del modelo estiman el comportamiento financiero de la propuesta en horizontes temporales superiores al primer mes de operación. A diferencia del bloque anterior, estas salidas no corresponden a mediciones directas del TO-BE, sino a proyecciones construidas a partir de los beneficios cuantificados y de la estructura de costos definida para la implementación.

Evaluación de Rentabilidad

La evaluación de rentabilidad proyecta el desempeño financiero del modelo mediante tres indicadores: período de recuperación, retorno de inversión a 3 años y valor presente neto a 5 años con una tasa de descuento del 8%. La Tabla 62 presenta estos indicadores y resume la capacidad del proyecto para recuperar la inversión inicial y generar valor económico sostenido.

Tabla 62 *Indicadores de Rentabilidad del Proyecto.*

Indicador Financiero	Cálculo y Resultado	Interpretación
Período de Recuperación (Payback)	$\$10.698 / \$35.576.40 = 0.30$ años ($\approx 3,6$ meses)	La inversión se recupera en menos de 4 meses, clasificándose como muy rápida.
Retorno de Inversión (ROI) a 3 años	$[(\$116,329.20 - \$17,098) / \$17,098] \times 100 = 580,5\%$	Por cada dólar invertido se recuperan \$5.81 en beneficios netos acumulados en 3 años. Rentabilidad extraordinariamente alta.
Valor Presente Neto (VPN) a 5 años (tasa 8%)	\$132.140 (Flujos descontados: Año 0: -\$10.698; Años 1-5: beneficios netos positivos)	El proyecto genera un valor neto positivo y significativo, confirmando que crea valor económico sustancial para HIDRO S.A.

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La proyección muestra un payback de 0,30 años (aproximadamente 3,6 meses), un ROI de 580,5% a 3 años y un VPN de 132.140 USD a 5 años. Estos resultados configuran un escenario de alta rentabilidad, en el que los beneficios cuantificados superan ampliamente los costos de implementación y operación del sistema.

En términos financieros, la proyección indica que la inversión no solo se recupera en un período corto, sino que además genera valor neto positivo y significativo para HIDRO S.A.

Bajo esta lógica, la implementación del modelo se proyecta como una intervención económicamente viable y con capacidad de sostener su institucionalización como práctica operativa estándar.

Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad evalúa la robustez del retorno de inversión frente a variaciones en los beneficios anuales estimados. Para ello, se proyecta el ROI a 3 años bajo tres escenarios: optimista, base y pesimista. La Tabla 63 presenta estos resultados y permite verificar si la rentabilidad se conserva bajo supuestos menos favorables que el caso central.

Tabla 63 *Análisis de Sensibilidad del ROI a 3 años.*

Escenario	Supuesto	Beneficio Anual (USD)	ROI a 3 años	Interpretación
Optimista	Mejoras un 20% superiores al caso base.	\$46.532	717%	Rentabilidad extraordinaria incluso superior a la estimación base.
Base (Caso Central)	Beneficios medidos y proyectados.	\$38.776	580,50%	Rentabilidad de referencia, ya clasificada como muy alta.
Pesimista	Mejoras un 30% inferiores al caso base.	\$27.143	377%	Rentabilidad sigue siendo muy alta y robusta, superando ampliamente el umbral de viabilidad.

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

En el escenario optimista, con beneficios anuales 20% superiores al caso base, el proyecto alcanza un ROI de 717%. En el escenario base, definido sobre beneficios medidos y proyectados, el ROI se mantiene en 580,50%. Incluso en el escenario pesimista, con beneficios 30% inferiores al caso central, el ROI alcanza 377%, valor que continúa muy por encima del umbral de viabilidad financiera.

La sensibilidad proyectada confirma que la rentabilidad del modelo es robusta ante variaciones razonables en los resultados operativos finales. En consecuencia, la sostenibilidad económica de la propuesta no depende de un escenario extraordinariamente favorable, sino que se mantiene incluso bajo condiciones conservadoras de desempeño.

Análisis de la curva S del proyecto

El análisis de la curva S evalúa el grado de cumplimiento de la ejecución respecto de la línea base definida en el Capítulo III, donde se estableció el cronograma valorado del proyecto con una duración de 8 semanas y una carga total de 162 HH. A partir de esta referencia, se

contrasta la trayectoria acumulada de HH planificadas con la trayectoria acumulada de HH reales ejecutadas durante la implementación.

El análisis de la curva S evalúa el grado de cumplimiento de la ejecución respecto de la línea base definida en el Capítulo III, donde se estableció el cronograma valorado del proyecto con una duración de 8 semanas y una carga total de 162 HH (Tabla 64). A partir de esta referencia, se contrasta la trayectoria acumulada de HH planificadas con la trayectoria acumulada de HH reales ejecutadas durante la implementación.

Tabla 64 *Curva S – HH planificadas vs HH reales (baseline vs ejecución).*

Semana	HH planificadas (baseline)	HH acumuladas plan	HH reales ejecutadas	HH acumuladas reales	Desviación (%)
S0	-	0	-	0	-
S1	30	30 (18,5%)	32	32 (19,0%)	6,70%
S2	24	54 (33,3%)	26	58 (34,5%)	8,30%
S3	18	72 (44,4%)	20	78 (46,4%)	11,10%
S4	16	88 (54,3%)	18	96 (57,1%)	12,50%
S5	36	124 (76,5%)	38	134 (79,8%)	5,60%
S6	18	142 (87,7%)	16	150 (89,3%)	-11,10%
S7	10	152 (93,8%)	12	162 (96,4%)	20,00%
S8	10	162 (100%)	6	168 (100%)	-40,00%
TOTAL	162 HH	-	168 HH	-	+3,7% total

Elaborador por Duche, Carlos (2026).

La comparación muestra una ejecución acumulada de 168 HH frente a 162 HH planificadas, lo que representa una desviación total de +3,7%. Esta diferencia equivale a 6 HH adicionales respecto de la línea base y a un costo real asociado de aproximadamente 200 USD, calculado con una tarifa promedio de 33 USD por hora. Dado que el presupuesto del proyecto incluyó una contingencia de 1.146 USD, la sobre-ejecución observada utilizó únicamente el 17,4% de dicho margen, lo que confirma que la desviación fue operativamente manejable y económicamente absorbible.

Cumplimiento de objetivos específicos

La Tabla 65 sintetiza la correspondencia entre cada objetivo específico, su indicador de verificación, la meta, el resultado obtenido y el tipo de resultado.

Tabla 65 Trazabilidad objetivos – indicadores – resultados obtenidos.

Objetivo	Indicador	Meta	Resultado	Tipo	Estado
OE1: Clasificar MRO (ABC-XYZ)	Cobertura clasificación	100 %	100 % (60/60)	Implementado	Cumplido
	Valor Clase A	≥ 75 %	78,72 %	Implementado	Cumplido
OE2: Parametrizar SS/ROP	Ítems A parametrizados	100 %	100 % (24/24)	Implementado	Cumplido
	Reducción SS agregado	≥ 20 %	23 %	Modelado	Cumplido
	Quiebres críticos mes 1	0	0	Medido	Cumplido
OE3: GMAO/CMMS	Trazabilidad OT-inv.	100 %	100 %	Implementado	Cumplido
	Nivel de servicio	≥ 90 %	94,8 %	Medido	Cumplido
	Reducc. horas perdidas	≥ 80 %	82,6 %	Medido	Cumplido
	Alertas ROP	Habilitadas	24 ítems A	Implementado	Cumplido

Elaborado por Duche, Carlos (2026).

En relación con el primer objetivo específico, se aplicaron los modelos de clasificación ABC y XYZ sobre el catálogo MRO, obteniéndose una segmentación cuantitativa del portafolio según valor económico y variabilidad de la demanda. La matriz ABC-XYZ identificó que los 24 ítems de Clase A concentran el 78,72% del valor total del inventario y que el segmento A–Z reúne 11 ítems con 45,03% del valor, lo que confirmó la necesidad de una priorización diferenciada de los ítems estratégicos del taller. En consecuencia, el objetivo de clasificar y jerarquizar el catálogo para orientar el control del inventario quedó cumplido.

En relación con el segundo objetivo específico, se estableció un modelo de gestión de inventarios probabilístico o estocástico para los repuestos de alta criticidad (Clase A), considerando la demanda histórica y los tiempos de entrega de los proveedores. La parametrización permitió calcular el stock de seguridad y el punto de reorden por ítem, generando un stock de seguridad agregado de 148 unidades valorizadas en 49.147,20 USD y un punto de reorden agregado de 335 unidades valorizadas en 104.821,44 USD. Además, la asignación diferenciada de niveles de servicio por segmento orientó la protección del inventario hacia los repuestos con mayor exposición al riesgo operacional. En consecuencia, el objetivo de determinar niveles óptimos de stock, stock de seguridad y punto de reorden quedó cumplido.

En relación con el tercer objetivo específico, se diseñó y ejecutó la integración de herramientas tecnológicas GMAO/CMMS para automatizar el seguimiento del consumo y asegurar la trazabilidad en tiempo real de los movimientos del inventario. La ejecución del componente incorporó catálogo unificado, gestión de OT, registro de consumos por OT, kardex en tiempo real, parametrización por ítem, disparador automático de reposición, cálculo del lead

time real y generación de indicadores. Como resultado, la trazabilidad OT–inventario alcanzó el 100% en el escenario TO-BE, y el sistema quedó habilitado para generar alertas sobre *ROP* y reportes periódicos de nivel de servicio, tasa de quiebre, rotación, obsolescencia y capital inmovilizado. En consecuencia, el objetivo de integrar el GMAO/CMMS como soporte de control operacional y trazabilidad quedó cumplido.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

La clasificación ABC-XYZ segmentó el catálogo MRO de acuerdo con el valor económico y la variabilidad de la demanda de cada ítem, lo que permitió diferenciar los repuestos que requieren control estricto de aquellos administrables con políticas simplificadas. Los resultados mostraron que los 24 ítems de Clase A concentran el 78,72 % del valor total del inventario, mientras que el segmento A-Z agrupa 11 ítems con el 45,03 % del valor, confirmando que un número reducido de referencias explica la mayor parte del riesgo económico del portafolio. Esta segmentación proporcionó una base cuantitativa para asignar recursos de control de forma proporcional a la criticidad y orientar las decisiones de reposición hacia los ítems estratégicos del taller.

La parametrización del modelo probabilístico para los repuestos de Clase A determinó el stock de seguridad y el punto de reorden de cada ítem a partir de la demanda histórica, la variabilidad del consumo y los tiempos reales de entrega de los proveedores. La política de servicio segmentada redujo en un 23 % el stock de seguridad agregado respecto de una política uniforme, sin registrar quiebres en los ítems críticos durante el primer mes del escenario TO-BE. Este resultado demuestra que la transición de un esquema empírico de reposición a una gestión sustentada en variabilidad, nivel de servicio y riesgo operacional disminuye simultáneamente el capital inmovilizado y la exposición a faltantes.

La integración del componente GMAO/CMMS automatizó el seguimiento del consumo y garantizó la trazabilidad en tiempo real de los movimientos de inventario, reemplazando las bitácoras en papel y las hojas de cálculo dispersas que caracterizaban al escenario AS-IS. La trazabilidad del flujo OT–inventario–compras pasó del 34,2 % al 100 %, y el sistema habilitó alertas automáticas sobre el punto de reorden, registro transaccional inmediato y generación de indicadores mediante un tablero de control mensual. La dependencia de métodos manuales quedó eliminada, y la gestión del inventario opera ahora sobre una infraestructura digital estructurada, auditable y capaz de sustentar procesos de mejora continua.

La articulación del modelo ABC-XYZ-NPR, la parametrización estocástica y la habilitación del GMAO/CMMS configuraron un sistema de gestión que optimiza la disponibilidad de repuestos para el mantenimiento preventivo en HIDRO S.A. Los indicadores del escenario TO-BE reflejan mejoras operativas cuantificables: el nivel de servicio alcanzó 94,8 %, la tasa de quiebre se redujo a 5,2 %, la rotación mejoró a 4,21 veces/año, las horas

perdidas disminuyeron a 7,8 h/mes y la trazabilidad llegó al 100 %. La implementación se completó dentro del plazo previsto de 8 semanas con una desviación de +3,7 % en horas-hombre, lo que confirma la viabilidad técnica, operativa y económica del sistema propuesto para reducir quiebres de stock y demoras en la ejecución del mantenimiento preventivo.

Limitaciones del estudio

El período de observación del escenario TO-BE comprende un mes (tres meses para el análisis descriptivo). Este horizonte limita las inferencias estadísticas sobre la estabilidad de las mejoras. La consolidación requerirá ampliar la medición a 6–12 meses.

La implementación se realizó en un único taller con 60 ítems. La generalización a otros talleres, flotas o contextos industriales requiere validación adicional.

La evaluación económica a 3–5 años es una proyección basada en supuestos de estabilidad. Variaciones en demanda, costos o lead times modificarían ROI, VPN y payback.

Los indicadores AS-IS se sustentaron en registros manuales con completitud del 60 %. La mejora real podría ser mayor que la reportada.

La parametrización estocástica se construyó con 12 meses de datos. Períodos atípicos podrían sesgar los cálculos de demanda y variabilidad.

Líneas de investigación futura

Extender el horizonte de medición del TO-BE a 12 meses para consolidar la evidencia estadística y validar la sostenibilidad de las mejoras.

Incorporar técnicas de pronóstico de demanda intermitente (Croston, SBA) para mejorar la precisión del stock de seguridad en ítems con consumo esporádico.

Explorar sensores IoT para monitoreo de condiciones en equipos críticos, transitando hacia mantenimiento predictivo.

Evaluar modelos de inventario colaborativo (VMI) con proveedores estratégicos para reducir lead times y stock de seguridad.

Recomendaciones

Se recomienda institucionalizar una revisión semestral de las clasificaciones ABC, XYZ y NPR, utilizando ventanas móviles de consumo y costo para detectar migraciones entre segmentos y actualizar la prioridad de control del portafolio. Este procedimiento permitirá que la segmentación mantenga correspondencia con la dinámica real de la demanda, con los

cambios en costos unitarios y con la criticidad operacional de los repuestos. La actualización periódica debe quedar registrada en una bitácora de cambios, de modo que la clasificación continúe cumpliendo su función como base de priorización del sistema.

Se sugiere programar una recalibración trimestral de los parámetros de stock de seguridad y punto de reorden, incorporando los consumos reales y los lead times registrados por el GMAO/CMMS durante cada período. Esta recalibración debe contemplar el ajuste de los niveles de servicio objetivo por segmento, la revisión de proveedores cuyos tiempos de entrega excedan el rango esperado y la evaluación del capital inmovilizado frente al riesgo de quiebre. La retroalimentación periódica del modelo estocástico con datos transaccionales actualizados fortalecerá la capacidad predictiva del sistema y evitará que los parámetros de reposición pierdan representatividad ante cambios en la demanda o en las condiciones de abastecimiento.

Es conveniente establecer un esquema formal de gobernanza del GMAO/CMMS, con roles definidos para mantenimiento, bodega, compras y análisis de inventarios, a fin de preservar la calidad del dato y la trazabilidad lograda en la implementación. Este esquema debe incluir campos obligatorios para despacho por OT, auditorías periódicas de registros, control de usuarios y validación de bitácoras transaccionales. La sostenibilidad del resultado alcanzado depende no solo de la herramienta, sino de la disciplina operativa con la que se mantenga la integridad del flujo OT–inventario–compras y la confiabilidad de los indicadores derivados del sistema.

Se recomienda extender el sistema de gestión de inventario MRO a las demás líneas de equipo y a los centros de operación regionales de HIDRO S.A., adoptando el mismo marco metodológico de clasificación, parametrización estocástica e integración tecnológica. El escalamiento debe acompañarse de un programa de capacitación continua dirigido al personal operativo y de bodega, así como de la definición de indicadores de mejora continua (nivel de servicio, tasa de quiebre, rotación y horas perdidas) con metas anuales revisadas por la dirección de operaciones. Este enfoque institucional asegurará que los beneficios obtenidos en el taller piloto se repliquen de manera sostenible en toda la organización.

Referencias

- Fortune Business Insights. (2025). *Construction Equipment Market Size, Share & Industry Analysis, By Equipment Type (Earthmoving Equipment, Material Handling Equipment & Cranes, Concrete Equipment, Road Building Equipment, Civil Engineering Equipment, Crushing and Screening Equipment, and*. Obtenido de <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/construction-equipment-market-100521>
- AEADE. (2024). *Sector Automotor en cifras*. Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. Obtenido de <https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2025/01/12.-Sector-en-Cifras-Resumen-Noviembre.pdf>
- Alomar, I., & Nikita, D. (2025). Managing Operational Efficiency and Reducing Aircraft Downtime by Optimization of Aircraft On-Ground (AOG) Processes for Air Operator. *Applied Sciences*, 5129. doi:<https://doi.org/10.3390/app15095129>
- Ayora, D. E., Rendon, I. A., & Lara, A. R. (2024). La Revolución Digital en las Pymes Ecuatorianas: Nuevos Modelos de Negocio y Oportunidades de Crecimiento. *Investigación, Tecnología e Innovación*, 1-10. doi:<https://doi.org/10.53591/iti.v16i22.1647>
- Banco Central del Ecuador. (2024). *The Ecuadorian economy reported a 2,2% contraction in the second quarter of 2024*. Obtenido de <https://www.bce.fin.ec/en/the-ecuadorian-economy-reported-a-2-2-contraction-in-the-second-quarter-of-2024/>
- Barreno, D. H., Landin, B. M., & Moreira, J. M. (2023). Propuesta metodológica para la importación de repuestos automotrices utilizados por vehículos livianos en el mercado ecuatoriano. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, 1560-1582. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9152080>
- Chen, J., Guisikhin, O., Finkenstaedt, W., & Liu, Y. N. (2019). Maintenance, Repair, and Operations Parts Inventory Management in the Era of Industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, 171-176. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.171>
- Chundhoo, V., Chattopadhyay, G., Karnakar, G., & Appyhamillage, G. K. (2025). mbedding risk in total productive maintenance model. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 1645-1662. doi:<https://doi.org/10.1007/s13198-025-02736-1>

- Corporación Financiera Nacional. (2023). *Ficha Sectoria Construcción*. Obtenido de <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/downloads/biblioteca/2023/fichas-sectoriales-1-trimestre/Ficha-Sectorial-Construccion.pdf>
- Fernandez, T. M., Blanco, O., Froiz, I., & Fraga, P. (2019). Towards an autonomous industry 4.0 warehouse: A UAV and blockchain-based system for inventory and traceability applications in big data-driven supply chain management. *Sensors*. doi:<https://doi.org/10.3390/s19102394>
- Global Market Insights. (2025). *Construction Equipment Telematics Market Size, Analysis Report 2034*. Global Market Insights Inc. Obtenido de <https://www.gminsights.com/industry-analysis/construction-equipment-telematics-market>
- Gong, J., Luo, Y., Qiu, Z., & Wang, X. (2022). Determination of key components in automobile braking systems based on ABC classification and FMECA. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 69-77. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2019.01.008>
- González, A. (2020). Un modelo de gestión de inventarios basado en estrategia competitiva. *Revista chilena de ingeniería*, 28(1), 133-142. doi:<https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000100133>
- Gorski, E. G., Loures, E., Santos, E. P., Kondo, R. E., & Martins, G. R. (2022). Towards a smart workflow in CMMS/EAM systems: An approach based on ML and MCDM. *Journal of Industrial Information Integration*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100278>
- Helmond, M. (2021). Supply Chain Management Tools. En Successful Management Strategies and Tools: Industry Insights, Case Studies and Best Practices. *Springer International Publishing*, 131-140. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-77661-9_12
- Hu, Q., Boylan, J. E., Chen, H., & Labib, A. (2018). OR in spare parts management: A review. *European Journal of Operational Research*, 395--414. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.058>
- Icontec. (2024). *NTC-ISO 55000:2024*.
- INEN. (2013). *Colores de Seguridad y Señales de Seguridad*. Obtenido de <https://pymsservices.com/storage/2020/02/NTE-INEN-ISO-3864-1-2013-S%C3%8DMBOLOS-GR%C3%81FICOS.-COLORES-DE-SEGURIDAD-Y-SE%C3%91ALES-DE-SEGURIDAD.pdf>

- ISO. (2000). *Industrias de petróleo y gas natural—Recolección e intercambio de datos de confiabilidad y mantenimiento de equipos (ISO 14224:1999)*. Obtenido de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:45001:ed-1:v1:es>
- ISO 45001. (2018). *Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo (2018)*.
- ISO 55000. (2014). *ISO 55000:2014(es), Gestión de activos—Aspectos generales, principios y terminología*. Obtenido de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:55000:ed-1:v2:es>
- Karim, M. R. (2025). Optimizing Maintenance Strategies in Smart Manufacturing: A Systematic Review Of Lean Practices, Total Productive Maintenance (TPM), And Digital Reliability. *Review of Applied Science and Technology*, 176-206. doi:<https://doi.org/10.63125/np7nnf78>
- Kelly, J., & Hardy, M. (2018). *A Roadmap to High Performance: ISO 55000 and a Management Systems Approach to Asset Management. Asset Leadership Network; 4Tell Solutions*. Obtenido de <https://www.knowledgepoint.com/wp-content/uploads/2018/07/Asset-Management-In-High-Performance-organisation-Whitepa>
- Macias, M. B., Lizandro, V. T., & Segundo, V. V. (2025). Comparación de la Aceptación de Repuestos Mecánicos Originales Versus Genéricos en El Mercado Automotriz de la Ciudad de Manta. *Polo del Conocimiento*, 1530-1551. doi:<https://doi.org/10.23857/pc.v10i12.10895>
- Maletič, D., Maletič, M., Al Najjar, B., & Gomišček, B. (2020). An Analysis of Physical Asset Management Core Practices and Their Influence on Operational Performance. *Sustainability*, 9097. doi:<https://doi.org/10.3390/su12219097>
- Ministerio de de Transporte y Obras Públicas. (2016). *Acuerdo Interministerial No. 001-2016: Emítense disposiciones para el uso de maquinaria y equipo pesado en la actividad minera y transporte comercial de carga pesada de productos forestales*.
- Paccha, C. E. (2023). Investigación de mercado para la importación y comercialización de repuestos para maquinaria pesada en la línea de excavadoras en el cantón Cuenca [Tesis de Maestría]. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26612>
- Quiroz, B. R., & Suárez, M. H. (2023). Análisis de la situación actual del mantenimiento en el sector automotriz. *Polo del Conocimiento*, 577-597. doi:<https://doi.org/10.23857/pc.v8i10.6142>
- Ribeiro, T. E., & Amaya, C. A. (2022). Modelo de toma de decisión para materiales de mantenimiento, reparación y operaciones (MRO). *Ciencia y Poder Aéreo*, 67-80. doi:<https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.722>

- Segura, M. Á., Gómez, G. A., & Barahona, G. (2024). Hacia el mejoramiento de la gestión de activos de equipos críticos en Pymes: Propuesta de metodología e implementación. *Revista Tecnología en Marcha*, 95-108. doi:<https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6699>
- Tapia , E. (2025). *Gobierno de Ecuador recorta en un 10% la inversión pública prevista para 2026, según la proforma*. Obtenido de <https://www.primicias.ec/economia/recorte-presupuesto-plan-anual-inversiones-proforma-noboa-109091/>
- Tapia, E. (2022). Inversión en seguridad crecerá, pero la obra pública caerá en 2023. *Primicias*. Obtenido de <https://www.primicias.ec/noticias/economia/inversion-seguridad-obras-presupuesto/>
- Zhang, S., Huang, K., & Yuan, Y. (2021). Spare Parts Inventory Management: A Literature Review. *Sustainability*, 2460. doi: <https://doi.org/10.3390/su13052460>
- Zhu, S., Jaarsveld, W. V., & Dekker, R. (2020). Spare parts inventory control based on maintenance planning. *Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106600. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106600>