



Carrera  
Ingeniería Civil Mecánica  
Universidad de Concepción

# **MODELO DE GESTIÓN DE MANTENIMIENTO PARA EQUIPOS CRÍTICOS EN PLANTA CMPC NIUFORM**

POR

**Matías Heyden Marabolí**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:  
Ing. Cristian Canales Cárdenas

Enero 2026  
Concepción, Chile

© 2026 Matías Heyden Marabolí

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## Agradecimientos

Deseo entregar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible el desarrollo de esta memoria de título.

En primer lugar, al profesor Cristian Canales, por su guía, comentarios y constante apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Su orientación fue fundamental para llevar a buen término esta investigación.

A los profesionales de Planta Niuform, quienes fueron un pilar fundamental y una invaluable fuente de conocimiento técnico para el desarrollo de cada una de las actividades. Su disposición y experiencia hicieron posible la implementación práctica de este proyecto.

Agradezco profundamente a quienes caminaron conmigo a lo largo de estos años universitarios. A todos esos amigos que se convirtieron en mi segunda familia y que, en más de una ocasión, fueron el impulso necesario para superar los momentos difíciles. Gracias a cada persona que dedicó un instante de su tiempo para hacerse presente de alguna manera.

Un reconocimiento especial a los Mecánicos del Fútbol, quienes me devolvieron la pasión por el deporte y me enseñaron que los colores más hermosos que alguna vez pude vestir son los de la Selección de Mecánica.

Quiero dedicar un momento para agradecer a todos aquellos que ya no están entre nosotros, pero sin quienes nada de esto habría sido posible. Mientras pude tenerlos conmigo, siempre me hicieron saber que contaba con su total apoyo y un cariño incondicional. Sé que desde el lugar donde se encuentran han hecho fuerzas para que pudiera superar cada prueba. Gracias, los llevo siempre en mi corazón.

Finalmente, quiero expresar mi más profunda gratitud a mi madre Leticia y a mi padre Claudio, quienes día a día son mi ejemplo de constancia y superación. Agradezco cada palabra de aliento y apoyo que resonó infinitamente en mi interior. Gracias por quererme tanto desde el primer día, por ser mi motivación, por acompañarme siempre y por nunca soltarme, incluso en los momentos más difíciles. No puedo dejar de mencionar a quien es la razón de mis días: mi hermana Camila. Me faltarían páginas para agradecer todo lo que haces por mí. Espero poder estar siempre a la altura de lo que una persona tan noble como tú merece. Gracias por todo familia, los amo infinitamente.

## Resumen

La presente memoria de título tiene como objetivo diseñar un modelo de gestión de mantenimiento orientado a equipos críticos para Planta CMPC Niuform. El trabajo aborda la necesidad de transitar desde un enfoque reactivo hacia una gestión proactiva, mediante la implementación de metodologías de análisis de criticidad, herramientas de confiabilidad y un sistema de indicadores de desempeño alineado con estándares internacionales.

Inicialmente, se implementó un sistema estructurado de registro en Google Sheets que recopiló 734 eventos de mantenimiento durante 5 meses (agosto-diciembre 2025), estableciendo por primera vez una base de datos trazable para análisis cuantitativos en la planta. El diagnóstico reveló que solo el 2.45% de las actividades corresponden a mantenimiento proactivo, significativamente inferior al benchmark de clase mundial ( $\geq 60\%$ ).

Para la identificación de equipos críticos se aplicó análisis de Pareto, determinando que 3 equipos de 37 (8.1%) concentran el 77.6% del tiempo total de detención. La clasificación fue validada estadísticamente mediante técnica Jack Knife (IEC  $\geq 94\%$ ), confirmando la robustez del ranking ante variaciones en los datos. Complementariamente, se caracterizó el comportamiento de falla mediante el modelo de Weibull, obteniendo parámetros de confiabilidad para los activos prioritarios.

Se desarrolló un dashboard interactivo en Python/Streamlit con 6 módulos funcionales (Panel ejecutivo, KPIs, Pareto, Weibull, Reportes, Calendario PM) que transforma datos operacionales en información accionable para la toma de decisiones. El piloto técnico ejecutado en el equipo más crítico (Moldurera Weinig) durante 2 meses demostró la viabilidad operacional del modelo, observándose reducción de fallas (-67%), disminución de tiempo de detención (-78%) y mejora de disponibilidad (+1.3 puntos porcentuales).

El modelo propuesto establece una línea base cuantitativa de indicadores operacionales (MTTR 74.82 min, Disponibilidad 98.3%) y demuestra que es posible adaptar metodologías de clase mundial a contextos de recursos limitados utilizando herramientas accesibles, estableciendo un modelo replicable para plantas manufactureras similares.

**Palabras clave:** Gestión de mantenimiento, equipos críticos, análisis de Pareto, Jack Knife, Weibull, confiabilidad, dashboard, CMPC.

## Abstract

This thesis aims to design a maintenance management model focused on critical equipment for the CMPC Niuform Plant. The work addresses the need to transition from a reactive approach to proactive management through the implementation of criticality analysis methodologies, reliability tools, and a performance indicator system aligned with international standards.

Initially, a structured recording system was implemented in Google Sheets, collecting 734 maintenance events over 5 months (August-December 2025), establishing for the first time a traceable database for quantitative analysis at the plant. The diagnosis revealed that only 2.45% of activities correspond to proactive maintenance, significantly lower than the world-class benchmark ( $\geq 60\%$ ).

For the identification of critical equipment, Pareto analysis was applied, determining that 3 out of 37 equipment (8.1%) account for 77.6% of total downtime. The classification was statistically validated using the Jack Knife technique ( $IEC \geq 94\%$ ), confirming the ranking robustness against data variations. Additionally, failure behavior was characterized using the Weibull model, obtaining reliability parameters for priority assets.

An interactive dashboard was developed in Python/Streamlit with 6 functional modules (Executive Panel, KPIs, Pareto, Weibull, Reports, PM Calendar) that transforms operational data into actionable information for decision-making. The technical pilot executed on the most critical equipment (Moldurera Weinig) over 2 months demonstrated the operational viability of the model, with observed failure reduction (-67%), downtime decrease (-78%), and availability improvement (+1.3 percentage points).

The proposed model establishes a quantitative baseline of operational indicators (MTTR 74.82 min, Availability 98.3%) and demonstrates that it is possible to adapt world-class methodologies to resource-limited contexts using accessible tools, establishing a replicable model for similar manufacturing plants.

**Keywords:** Maintenance management, critical equipment, Pareto analysis, Jack Knife, Weibull, reliability, dashboard, CMPC.

# Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos .....	iv
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tablas.....	vii
Nomenclatura.....	viii
1 CAPÍTULO 1: Introducción .....	1
1.1 Contexto .....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	1
1.3 Justificación del trabajo.....	3
1.4 Objetivos.....	5
1.5 Alcance y limitaciones.....	5
1.6 Metodología.....	6
2 CAPÍTULO 2: Marco teórico y conceptual .....	8
2.1 Evolución histórica del mantenimiento industrial .....	8
2.2 Normas y estándares de gestión de activos.....	9
2.3 Metodologías de gestión de mantenimiento.....	11
2.4 Análisis de criticidad de equipos .....	13
2.5 Herramientas estadísticas para análisis de confiabilidad .....	15
2.6 Indicadores clave de desempeño (KPIs).....	19
3 CAPÍTULO 3: Diagnóstico de la situación actual .....	20
3.1 Caracterización de Planta Niuform.....	20
3.2 Sistema de registro implementado.....	20
3.3 Análisis de datos históricos.....	21
3.4 Identificación de equipos críticos .....	24
3.5 Evaluación de madurez del mantenimiento.....	26
4 CAPÍTULO 4: Diseño del modelo de gestión propuesto .....	29
4.1 Marco conceptual del modelo .....	29
4.2 Metodología de clasificación ABC aplicada.....	33
4.3 Sistema de indicadores de desempeño (KPIs).....	43
4.4 Procedimientos operacionales estándar .....	51
4.5 Plan de implementación y hoja de ruta .....	52
5 CAPÍTULO 5: Plan de implementación y validación proyectada.....	62
5.1 Sistema de registro: Diagnóstico ejecutado y lecciones aprendidas .....	62

5.2 Desarrollo del Dashboard Streamlit .....	63
5.3 Caso de estudio: Validación piloto en Moldurera Weinig.....	67
5.4 Indicadores de desempeño y línea base.....	70
5.5 Validación del modelo.....	73
6 CAPÍTULO 6: Conclusiones .....	77
6.1 Conclusiones generales.....	77
6.2 Evaluación del cumplimiento de objetivos.....	77
6.3 Contribuciones del trabajo .....	78
6.4 Limitaciones del estudio.....	78
6.5 Trabajos futuros.....	78
Referencias .....	80
ANEXOS .....	82

## Lista de Figuras

Figura 1: Evolución histórica del mantenimiento industrial.....	8
Figura 2: Clasificación ABC de criticidad y estrategias de mantenimiento .....	15
Figura 3: Diagrama de Pareto - Principio 80/20 aplicado a mantenimiento.....	16
Figura 4: Distribución de Weibull - Patrones de comportamiento de falla .....	17
Figura 5: Distribución temporal de intervenciones y detenciones (Agosto-Diciembre 2025) .....	22
Figura 6: Análisis de Pareto - Tiempo de detención por equipo (Agosto-Diciembre 2025).....	23
Figura 7: Distribución de actividades de mantenimiento - Proactivo vs Reactivo .....	24
Figura 8: Evaluación de madurez del mantenimiento - Niuform vs Clase Mundial .....	27
Figura 9: Matriz de criticidad frecuencia-consecuencia con clasificación de equipos Niuform .....	32
Figura 10: Carta Gantt - Plan de implementación del modelo de gestión (24 meses).....	59
Figura 11: Diagrama Ishikawa - Análisis de falla de rodamiento MOLDURERA WEINIG .....	89

## Lista de Tablas

Tabla 1: Comparación RCM vs TPM .....	13
Tabla 2: Criterios para la evaluación de criticidad de activos.....	13
Tabla 3: Indicadores clave de desempeño de mantenimiento .....	19
Tabla 4: Clasificación ABC de equipos de Niuform y distribución de recursos de mantenimiento..	35
Tabla 5: Estructura FMEA simplificado - Ejemplo Moldurera Weinig .....	37
Tabla 6: Plan Mantenimiento Moldurera Weinig .....	40
Tabla 7: Plan mantenimiento PBA.....	41
Tabla 8: Metas de indicadores estratégicos por horizonte temporal .....	50
Tabla 9: Matriz de riesgo de implementación y estrategias de mitigación.....	59
Tabla 10: Variables del sistema de registro por categoría .....	62
Tabla 11: Stock mínimo de repuestos críticos Moldurera Weinig.....	68
Tabla 12: Tareas preventivas ejecutadas - Período piloto (Nov-Dic 2025) .....	68
Tabla 13: Comparación de indicadores pre/post intervención - Moldurera Weinig.....	69
Tabla 14: Indicadores estratégicos (nivel gerencial) .....	70
Tabla 15: Indicadores tácticos (nivel supervisión).....	71
Tabla 16: Distribución temporal de intervenciones .....	71
Tabla 17: Distribución por especialidad técnica .....	71
Tabla 18: Concentración de impacto (Pareto) .....	71
Tabla 19: Análisis de brechas respecto a benchmarks industriales .....	72
Tabla 20: Proyecciones a 12 meses (Fase 1-2).....	72
Tabla 21: Proyecciones a 24 meses (Fase 3-4).....	72
Tabla 22: Frecuencia de revisión de indicadores de nivel.....	73
Tabla 23: Validación del sistema de registro .....	74
Tabla 24: Validación de la clasificación de criticidad .....	74
Tabla 25: Validación de planes de mantenimiento.....	74
Tabla 26: Validación del dashboard de indicadores.....	74
Tabla 27: Resumen de variaciones observadas en piloto.....	75
Tabla 28: Evaluación del cumplimiento de objetivos.....	77
Tabla 29: Estructura de campos del sistema de registro .....	82
Tabla 30: Especialidades técnicas disponibles.....	82
Tabla 31: Especialidades técnicas disponibles.....	83
Tabla 32: Grupos productivos de planta .....	83
Tabla 33: Ejemplo de registro de intervención.....	83
Tabla 34: Clasificación ABC completa de equipos.....	84
Tabla 35: Resumen por categoría .....	84
Tabla 36: Estructura del sistema de registro implementado .....	86

## Nomenclatura

ABC	:	Clasificación de criticidad (A=Crítico, B=Importante, C=Secundario)
ACR	:	Análisis de Causa Raíz
APT	:	Acciones de Planificación Táctica
BEST	:	Business Excellence System for Transformation
CEN	:	Comité Europeo de Normalización
CMMS	:	Computerized Maintenance Management System
CMPC	:	Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones
CNC	:	Control Numérico Computarizado
D	:	Probabilidad de detección
EPS	:	Empresa Prestadora de Servicios
ERP	:	Enterprise Resource Planning
ES	:	En Servicio
FMEA	:	Failure Mode and Effects Analysis
FMECA	:	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis
GLT	:	Grupo de Liderazgo Técnico
$H_m$	:	Horas de mantenimiento correctivo y preventivo planificado
$H_{mc}$	:	Horas de mantenimiento correctivo por detención imprevista
$H_p$	:	Horas periodo de evaluación
IEC	:	Índice de Estabilidad de Clasificación
ISO	:	International Organization for Standardization
KPI	:	Key Performance Indicator
LCCA	:	Life Cycle Cost Analysis
MLE	:	Maximum Likelihood Estimation
MTBF	:	Mean Time Between Failures
MTTR	:	Mean Time To Repair
n	:	Tamaño de la muestra
$N_f$	:	Número de fallas
$N_r$	:	Número de reparaciones

O	:	Ocurrencia esperada
OEE	:	Overall Equipment Effectiveness
OPL	:	One Point Lesson
OT	:	Orden de Trabajo
PBA	:	Prensa de Baja Automática (equipo CNC)
PDCA	:	Plan-Do-Check-Act
PGP	:	Parada General de Planta
PM	:	Plant Maintenance (módulo SAP)
PNP	:	Parada No Planificada
PP	:	Parada Planificada
RASCI	:	Responsible, Accountable, Support, Consulted, Informed
RAV	:	Revisión de Activos por Valor
RCM	:	Reliability Centered Maintenance
ROI	:	Return on Investment
RPN	:	Risk Priority Number
S	:	Severidad del efecto
SAE	:	Society of Automotive Engineers
SAMP	:	Strategic Asset Management Plan
SAP	:	Systeme, Anwendungen und Produkte (software ERP)
SCADA	:	Supervisory Control and Data Acquisition
SIPOC	:	Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers
SMA	:	Seguridad y Medio Ambiente
SMART	:	Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time-bound
SMRP	:	Society for Maintenance & Reliability Professionals
<i>t</i>	:	Tiempo
$t_i$	:	Tiempos hasta la falla
T	:	Tiempo total de operación
TCO	:	Total Cost of Ownership
TPM	:	Total Productive Maintenance
$T_r$	:	Tiempo total de reparación

TTF : Time To Failure  
 $w_i$  : Peso de criticidad del equipo i

### **Símbolos**

$\beta$  : Parámetro de forma de distribución Weibull  
 $\eta$  : Tiempo característico de falla (parámetro de escala Weibull)  
 $\lambda$  : Tasa de falla  
% : Porcentaje

# **CAPÍTULO 1: Introducción**

## **1.1 Contexto**

CMPC (Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones) es una de las empresas forestales-industriales más importantes de Latinoamérica, con presencia en Chile y otros países de la región. La división CMPC Maderas opera diferentes plantas especializadas en productos de madera de alto valor agregado, entre ellas Planta Niuform, ubicada en Los Ángeles, Región del Biobío.

Planta Niuform se dedica a la fabricación de elementos estructurales de madera laminada encolada (GLT) y paneles de madera contralaminada (CLT), productos destinados principalmente a proyectos de construcción industrializada y aplicaciones de ingeniería estructural. A diferencia de otras plantas industriales con producción en serie, Niuform opera bajo un modelo productivo orientado a proyectos específicos donde cada orden de fabricación responde a diseños estructurales personalizados con dimensiones, geometrías y propiedades mecánicas particulares según requerimientos de cada cliente.

La planta cuenta con equipos especializados de alta tecnología, incluyendo centros de mecanizado CNC de 5 ejes, prensas hidráulicas de gran formato, líneas automatizadas de finger joint (sistemas de ensamble de madera mediante uniones dentadas encoladas), moldureras de control numérico, sistemas de extracción de polvo, climatización y equipos auxiliares de manipulación de materiales. En total, se gestionan 37 equipos productivos y de soporte que requieren mantención preventiva y correctiva para asegurar la continuidad operacional.

Desde el punto de vista corporativo, CMPC ha implementado el modelo BEST (Business Excellence System for Transformation) como marco de gestión orientado a la excelencia operacional. Este modelo establece estándares y expectativas claras para todas las áreas de la organización, incluyendo la gestión de mantenimiento. Sin embargo, la implementación efectiva de estos estándares en una planta relativamente nueva como Niuform, que aún se encuentra en proceso de consolidación de sus sistemas y procesos, representa un desafío importante que requiere no solo la adopción de metodologías técnicas reconocidas, sino también el desarrollo de capacidades internas y la implementación de herramientas de gestión adaptadas al contexto operacional específico de la planta.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Planta Niuform enfrenta una situación particular en cuanto a la gestión de mantenimiento de sus activos productivos: si bien la planta mantiene niveles aceptables de disponibilidad operacional en sus equipos principales, el área de mantenimiento presenta un bajo nivel de madurez organizacional y una estructura de gestión poco desarrollada. Esta condición se manifiesta en la ausencia de un sistema estructurado de registro y trazabilidad de las intervenciones de mantenimiento, lo que dificulta la toma de decisiones basadas en datos y limita la capacidad de identificar tendencias, problemas recurrentes y oportunidades de mejora.

Hasta agosto de 2025, el registro de actividades de mantenimiento se realizaba de manera informal mediante bitácoras manuales y planillas Excel dispersas entre diferentes técnicos, sin un formato estandarizado ni una consolidación sistemática de la información. Esto generaba pérdida de información valiosa, dificultaba el análisis histórico de fallas y hacía prácticamente imposible cuantificar el desempeño real del mantenimiento.

A partir de agosto de 2025 se implementó un sistema de registro estructurado en Google Sheets como herramienta de almacenamiento y trazabilidad, priorizando soluciones de bajo costo y fácil acceso para todo el equipo. Esta decisión se tomó considerando las restricciones presupuestarias de la planta y la necesidad de contar con una solución rápida que pudiera ser adoptada sin grandes inversiones en software especializado. Adicionalmente, esta base de datos está estructurada pensando en una futura migración al módulo SAP PM una vez que la planta cuente con las licencias necesarias habilitadas.

Durante el periodo de agosto a diciembre de 2025, se recopilaron 734 registros de intervenciones de mantenimiento en 37 equipos únicos. El análisis preliminar de estos datos revela las siguientes condiciones:

- Total de intervenciones registradas: 734 eventos.
- Equipos bajo control: 37 activos productivos y auxiliares.
- Intervenciones con detención productiva: 38 eventos (5.2% del total).
- Intervenciones sin detención: 696 eventos (94.8% del total).

De los 38 eventos con detención, se calculó el Tiempo Medio de Reparación (MTTR) mediante la **Ecuación 1**:

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ri}}{n} \quad (1)$$

Donde:

- MTTR = Tiempo medio de reparación (minutos)
- $T_{ri}$  = Tiempo de reparación del evento  $i$  (minutos)
- $n$  = Número total de eventos con detención

Se obtiene un valor de MTTR promedio de 74.82 minutos (aproximadamente 1.25 horas) indica que cuando ocurre una falla que genera detención productiva, el tiempo promedio para resolverla es relativamente bajo, lo cual es positivo. Sin embargo, la mediana de las detenciones es de 35.5 minutos, lo que sugiere que la mayoría de las reparaciones son rápidas, pero existen algunas intervenciones prolongadas que elevan el promedio. De hecho, el 42.1% de las detenciones superaron los 60 minutos, indicando que hay eventos de mayor complejidad que afectan significativamente la continuidad operacional.

Aplicando el análisis de Pareto (principio 80/20) al tiempo acumulado de detención por equipo, se identificó que solo 3 equipos de los 37 (8.1% del total) concentran el 80% del tiempo total de detención productiva.

1. Moldurera Weinig: 1,262 minutos de downtime acumulado (21 horas).

2. PBA (Centro de mecanizado CNC): 579 minutos (9.7 horas).
3. Finger 2 (Equipo de ensamble): 364 minutos (6.1 horas).

Esta concentración evidencia la importancia de implementar un enfoque de gestión basado en criticidad, donde los recursos y esfuerzos de mantenimiento se focalicen prioritariamente en estos activos de mayor impacto operacional.

En cuanto a las especialidades técnicas involucradas, las intervenciones se distribuyen de la siguiente forma:

- Mecánica: 292 intervenciones (39.8%).
- Eléctrica: 190 intervenciones (25.9%).
- Servicios generales: 133 intervenciones (18.1%).
- Neumática: 64 intervenciones (8.7%).
- Hidráulica: 52 intervenciones (7.1%).

Un indicador crítico del nivel de madurez del mantenimiento es la proporción de actividades proactivas versus reactivas. Durante el periodo analizado se registraron 16 Análisis de Causa Raíz (ACR) y 2 Acciones Preventivas Temporales (APT), totalizando 18 intervenciones proactivas, lo que representa apenas el 2.45% del total de registros. Este porcentaje extremadamente bajo contrasta con los estándares de industria de clase mundial, donde se espera que al menos el 60% de las actividades de mantenimiento sean planificadas y preventivas [1, 2].

Además de la falta de trazabilidad histórica, se identifican las siguientes brechas:

- **Estructura organizacional:** El área de mantenimiento carece de una estructura formal que separe las funciones de planificación, programación y ejecución. No existen roles específicos para análisis de confiabilidad o gestión de activos críticos.
- **Procesos y procedimientos:** No se identificaron procedimientos documentados para la ejecución de mantenimientos preventivos ni para el manejo de fallas críticas durante el periodo de diagnóstico. La planificación se realiza de manera informal, sin calendarios estructurados.
- **Herramientas informáticas:** Si bien la planta cuenta con acceso al sistema SAP, actualmente las licencias del módulo PM no están habilitadas. Esto obliga a mantener registros paralelos en herramientas básicas (Excel, Google Sheets), con el inconveniente de que no hay integración con otros módulos operacionales.
- **Gestión del conocimiento:** El conocimiento sobre los equipos, sus modos de falla característicos y mejores prácticas reside principalmente en la experiencia de los técnicos senior, sin documentación formal que permita transferir este conocimiento al resto del equipo.

### 1.3 Justificación del trabajo

El desarrollo de este trabajo se justifica desde múltiples perspectivas que consideran aspectos técnicos, económicos y organizacionales.

### **1.3.1 Justificación técnica**

La implementación de un sistema estructurado de gestión de mantenimiento permite pasar desde un enfoque predominantemente reactivo (donde el 97.5% de las actividades responden a eventos o solicitudes) hacia un modelo más equilibrado con mayor componente preventivo y predictivo. La literatura técnica indica que las organizaciones industriales de clase mundial mantienen proporciones de al menos 60-70% de mantenimiento planificado versus 30-40% correctivo, lo que se traduce en mayor confiabilidad operacional y menores costos de ciclo de vida de los activos [3, 4].

El análisis de criticidad basado en el principio de Pareto demuestra que focalizando los recursos de mantenimiento en el 8% de equipos más críticos se puede impactar el 80% de las pérdidas operacionales por detenciones, optimizando la asignación de esfuerzo y presupuesto [5]. Adicionalmente, la aplicación de técnicas de análisis de confiabilidad como la distribución de Weibull permite caracterizar los patrones de falla de los equipos y determinar frecuencias óptimas de intervención basadas en datos reales en lugar de estimaciones arbitrarias o recomendaciones genéricas de fabricantes [3, 6].

### **1.3.2 Justificación económica**

Desde el punto de vista económico, el proyecto se fundamenta en un enfoque de bajo costo que maximiza el aprovechamiento de herramientas gratuitas y recursos existentes. La decisión de utilizar Google Sheets como plataforma de almacenamiento, Python (con librerías open-source como pandas, matplotlib, plotly) para análisis de datos, y Streamlit como framework para el dashboard, permite desarrollar una solución funcional sin incurrir en licenciamiento de software especializado costoso.

Este enfoque pragmático responde a la realidad de una planta en etapa de consolidación que no cuenta actualmente con presupuesto asignado para sistemas de gestión de mantenimiento computarizado (CMMS) comerciales. Sin embargo, la estructura de datos implementada está diseñada pensando en una futura migración al módulo SAP PM una vez que las licencias estén habilitadas, asegurando que el trabajo realizado no se pierda y pueda integrarse con el sistema corporativo de CMPC.

Adicionalmente, la reducción de mantenimientos correctivos no planificados y la optimización de tiempos de reparación genera ahorros tangibles en costos de mano de obra (horas extra, urgencias), costos de repuestos (compras de emergencia con sobreprecio) y costos de oportunidad por pérdida de producción. Estudios referenciales indican que el costo del mantenimiento correctivo puede ser entre 3 y 5 veces superior al mantenimiento preventivo planificado [7].

### **1.3.3 Justificación organizacional**

El trabajo contribuye al desarrollo de capacidades internas en la planta, estableciendo una cultura de gestión basada en datos y mejora continua. Al documentar procesos, generar procedimientos estandarizados y desarrollar herramientas digitales de fácil uso, se reduce la dependencia del

conocimiento tácito de personas específicas y se facilita la transferencia de conocimiento a nuevos integrantes del equipo.

Desde la perspectiva corporativa, el proyecto se alinea con los principios del modelo BEST de CMPC en cuanto a excelencia operacional, estandarización de procesos y toma de decisiones fundamentadas. Adicionalmente, el modelo desarrollado puede servir como referencia para otras plantas que enfrentan desafíos similares, generando valor más allá de Niuform.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

Diseñar un modelo de gestión de mantenimiento orientado a equipos críticos para Planta CMPC Niuform.

### 1.4.2 Objetivos específicos

**OE1 Diagnosticar el estado actual de la gestión de mantenimiento:** Caracterizar los procesos, herramientas y nivel de madurez del mantenimiento actual, identificando brechas respecto a mejores prácticas.

**OE2 Implementar un sistema de registro y trazabilidad:** Desarrollar una base de datos estructurada para el registro sistemático de intervenciones, compatible con futura migración a SAP PM.

**OE3 Identificar equipos críticos mediante análisis de criticidad:** Clasificar los activos según su impacto operacional utilizando análisis de Pareto, Jack Knife, criterios de criticidad técnico-operacionales.

**OE4 Definir estrategias de mantenimiento diferenciadas:** Establecer estrategias de mantenimiento específicas para cada nivel de criticidad, considerando metodologías RCM y análisis de confiabilidad.

**OE5 Validar el modelo mediante aplicación piloto:** Ejecutar una prueba controlada del modelo propuesto en el equipo más crítico durante un periodo de dos meses, evaluando el impacto en los indicadores de mantenimiento y la factibilidad operacional de las estrategias diseñadas.

## 1.5 Alcance y limitaciones

El presente trabajo se enfoca en el diseño de un modelo de gestión de mantenimiento para los 37 equipos productivos y auxiliares de Planta Niuform, basado en el análisis de 734 registros de intervenciones recopilados entre agosto y diciembre de 2025 (periodo de 5 meses).

El proyecto contempla el desarrollo completo del modelo conceptual, la implementación del sistema de registro en Google Sheets, el desarrollo de la herramienta digital (dashboard en Streamlit), y la validación mediante datos reales. No incluye la implementación física completa de todos los equipos ni la evaluación de impacto de largo plazo, quedando estas etapas con trabajo futuro para la planta y el modelo.

Principales limitaciones:

- **Datos históricos:** No existen registros estructurados previos a agosto 2025, lo que limita análisis comparativo de largo plazo y caracterización de patrones estacionales.
- **Herramientas informáticas:** Las licencias del módulo SAP PM no están actualmente habilitadas, obligando al uso de soluciones alternativas de bajo costo (Google Sheets, Python open-source). La estructura de datos está diseñada para facilitar la migración futura a SAP.
- **Periodo de análisis:** Los 5 meses de datos permiten caracterizar el estado actual e identificar equipos críticos, pero no son suficientes para análisis de confiabilidad de largo plazo o determinación precisa de MTBF por equipo.
- **Información técnica:** Algunos equipos no cuentan con documentación técnica completa (manuales de fabricante, especificaciones de diseño), limitando la profundidad del análisis de modos de falla.

## 1.6 Metodología

El trabajo se desarrolló siguiendo el enfoque de investigación aplicada con diseño mixto (cuantitativo y cualitativo), organizado en las siguientes etapas:

### OE1: Diagnosticar el estado actual.

Se realizó levantamiento de procesos mediante entrevistas con el jefe de mantenimiento y técnicos, observación directa de actividades, y revisión de registros históricos disponibles. Se evaluó el nivel de madurez del mantenimiento y se identificaron brechas respecto a mejores prácticas.

### OE2: Implementar sistema de registro.

Se diseñó la estructura de base de datos en Google Sheets definiendo campos clave: fecha, turno, equipo, especialidad, tipo de intervención, observaciones, tiempos de detención, y clasificación de actividades proactivas (ACR/APT). Se capacitó al equipo de mantenimiento en el registro estructurado y se recopiló información durante 5 meses (agosto-diciembre 2025), obteniendo 734 registros.

### OE3: Identificar equipos críticos.

Se aplicó análisis de Pareto al tiempo acumulado de detención por equipo para identificar aquellos que concentran el 80% del impacto operacional. Se complementó con análisis Jack Knife para validar la estabilidad de la clasificación mediante técnicas de remuestreo estadístico, y con criterios adicionales de impacto en producción, seguridad y costos de falla, generando una clasificación en tres niveles (Crítico A, Importante B, Estándar C).

### OE4: Definir estrategias diferenciadas.

Para cada nivel de criticidad se definieron estrategias de mantenimiento específicas, considerando principios de RCM [3] para equipos críticos A (mantenimiento basado en condición y análisis de fallas), planes preventivo calendario para equipos B, y mantenimiento correctivo para equipos C.

Técnicas de análisis utilizadas:

- **Estadística descriptiva:** Cálculo de MTTR, medianas, desviaciones estándar según ISO 14224 [8].
- **Análisis de Pareto** para identificación de equipos críticos.
- **Análisis Jack Knife** para validación estadística de la clasificación de criticidad.

- **Distribución de Weibull** para modelado de confiabilidad [9].
- Análisis de tendencias temporales distribución por especialidad.
- Benchmarking con estándares SMRP [1] y casos de referencia en la industria.

**OE5: Validar el modelo piloto.**

Se seleccionó como equipo piloto el activo más crítico identificado. Durante noviembre y diciembre de 2025 se aplicaron las estrategias de mantenimiento diseñadas, registrando indicadores de desempeño para comparar con el periodo de diagnóstico (agosto-octubre). La validación incluyó: ejecución de tareas preventivas programadas, aplicación de procedimientos documentados, y medición de tiempo de detención post-intervención.

# CAPÍTULO 2: Marco teórico y conceptual

## 2.1 Evolución histórica del mantenimiento industrial

La gestión del mantenimiento industrial ha experimentado una transformación profunda desde sus inicios, evolucionando desde una función meramente correctiva hacia un proceso estratégico integrado con los objetivos organizacionales. Esta evolución se puede sintetizar en tres etapas principales que marcan hitos conceptuales y metodológicos relevantes para el contexto actual [2, 5], tal como se ilustra en la **Figura 1**.

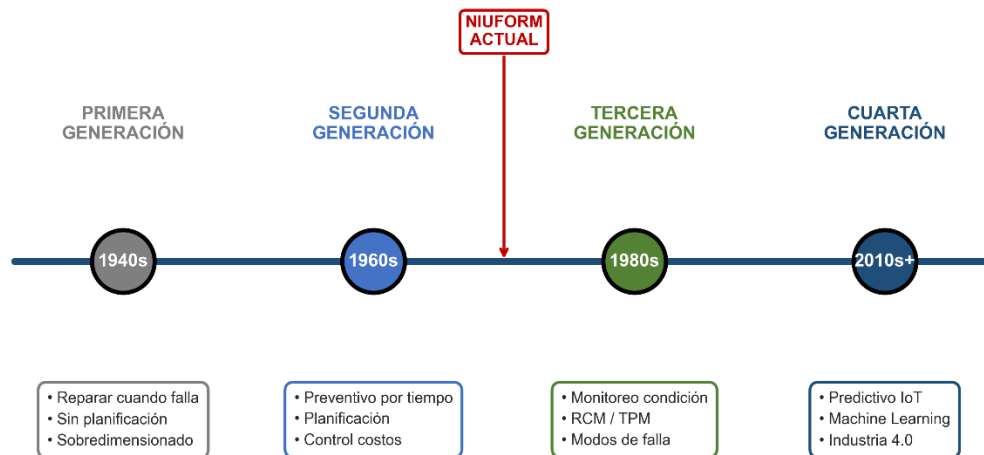


Figura 1: Evolución histórica del mantenimiento industrial

La primera etapa, conocida como Era Correctiva-Preventiva (hasta 1970), se caracterizó por la predominancia de la filosofía del “arreglar cuando se rompa”. Durante este periodo, los equipos industriales eran robustos y operaban a velocidades relativamente bajas, minimizando la frecuencia de fallas críticas. El mantenimiento se consideraba un “mal necesario” sin departamentos especializados ni planificación formal.

La Segunda Guerra Mundial marcó un punto de inflexión al introducir el concepto de **mantenimiento preventivo** basado en tiempo o uso. Se establecieron por primera vez programas de inspección, lubricación y reemplazo de componentes en intervalos fijos, independientemente de su condición real. Surgieron departamentos formales de mantenimiento, documentación técnica básica y primeros sistemas de control de costos.

Sin embargo, el mantenimiento preventivo clásico presentaba limitaciones importantes: frecuentemente se intervenían equipos que no lo requerían (sobre-mantenimiento) mientras otros fallaban prematuramente (sub-mantenimiento), al no considerar la condición real de los componentes [3].

La segunda etapa, denominada Era Predictiva y Estratégica (1970-2000), surgió a partir del incremento de la automatización industrial, la crisis del petróleo de los años 70 y la competencia global impulsaron la necesidad de maximizar la disponibilidad de activos mientras se optimizaban costos. Surgieron dos desarrollos fundamentales:

1. **Mantenimiento predictivo:** Basado en el monitoreo de la condición real de los equipos mediante técnicas como análisis de vibraciones, termografía infrarroja, análisis de aceites y ultrasonido [10]. Esto permitió intervenir solo cuando era necesario, optimizando recursos y reduciendo paradas innecesarias.
2. **Reliability-Centered Maintenance (RCM):** Desarrolló originalmente por la industria aeronáutica estadounidense, el RCM introdujo un enfoque sistemático para determinar qué tareas de mantenimiento debían realizarse, con qué frecuencia y mediante qué estrategia, basándose en análisis de funciones, modos de falla y consecuencias [3].

Esta etapa también incorporó conceptos de gestión estratégica mediante metodologías como **Total Productive Maintenance (TPM)**, originado en Japón, que promueve la participación de todos los niveles organizacionales en el mantenimiento, desde operadores hasta directivos [2]. Surgieron sistemas ERP integrados con módulos especializados (SAP PM, Oracle), análisis de costo total de propiedad (LCCA) y optimización de inventarios de repuestos.

La tercera etapa (2000 hasta el presente), caracterizada por la gestión de activos y la transformación digital, enmarca la gestión moderna del mantenimiento se enmarca en el concepto amplio de Asset Management o gestión de activos, formalizado en la norma **ISO 55001:2014** [11]. Este enfoque integra aspectos financieros, técnicos, organizacionales y estratégicos en la toma de decisiones sobre el ciclo de vida completo de los activos físicos.

Paralelamente, la Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0) introduce tecnologías disruptivas: Internet of Things (IoT) para monitoreo en tiempo real, Big Data y Analytics para análisis predictivo, Machine Learning para optimización de estrategias, y Digital Twins para simulación de comportamiento de activos.

Este contexto define el mantenimiento como una **función estratégica** que contribuye directamente a la creación de valor, competitividad organizacional y sostenibilidad operaciones [4].

### **2.1.1 Implicaciones para el contexto de CMPC Niuform**

El análisis de esta evolución histórica permite contextualizar la situación de Niuform: la planta se encuentra en una etapa de transición entre la Primera Etapa (mantenimiento correctivo con preventivo incipiente) y la Segunda Etapa (incorporación de análisis de confiabilidad y uso de datos estructurados). El desafío consiste en acelerar esta transición incorporando elementos de etapas superiores (gestión estratégica, herramientas digitales) de manera adaptada al contexto operacional específico.

## **2.2 Normas y estándares de gestión de activos**

### **2.2.1 ISO 55001: Asset Management**

La norma **ISO 55001:2014** establece los requisitos para un sistema de gestión de activos que permita a las organizaciones desarrollar, implementar, mantener y mejorar la gestión de sus activos físicos de manera sistemática y sostenible [11].

La norma se estructura sobre tres componentes fundamentales:

La norma se estructura sobre tres componentes fundamentales. El primero, la política y estrategia de activos, define el marco de referencia para gestión de activos, estableciendo cómo se contribuye

a los objetivos organizacionales. Incluye la declaración de principios que guían las decisiones sobre inversión, operación y mantenimiento de activos a lo largo de su ciclo de vida.

El segundo componente, el Plan estratégico de gestión de activos (SAMP), documenta cómo la política de activos se implementa mediante objetivos específicos, planes de acción, asignación de recursos y definición de responsabilidades. Establece el horizonte temporal y los criterios de toma de decisiones considerando aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales.

El tercer componente corresponde a los sistemas de gestión de activos que comprenden los procesos, herramientas y mecanismos operacionales que permiten ejecutar el SAMP, incluyendo: toma de decisiones basada en riesgo, gestión de información y datos, mejora continua mediante ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act), y auditorías de desempeño.

La implementación de ISO 55001 proporciona beneficios tangibles: optimización de decisiones de inversión en activos, reducción de costos operacionales, mejora de desempeño y confiabilidad, cumplimiento normativo y regulatorio, y mejora de la reputación organizacional ante stakeholders.

### 2.2.2 ISO 14224: Recolección e intercambio de datos de confiabilidad

La norma **ISO 14224:2016** proporciona una estructura estandarizada para la recolección, clasificación y análisis de datos de confiabilidad y mantenimiento en industrias de procesos [8]. Aunque originalmente desarrollada para las industrias de petróleo, petroquímica y gas natural, sus principios son aplicables a cualquier sector industrial que requiera gestión estructurada de información de activos.

En cuanto a la taxonomía de equipos, la norma establece una clasificación jerárquica estandarizada de equipos, componentes y sistemas que facilita el análisis comparativo entre diferentes plantas e industrias. Esta taxonomía incluye niveles de desagregación desde instalaciones completas hasta componentes industriales.

Respecto a las definiciones estandarizadas de KPIs, la norma ISO 14224 define rigurosamente indicadores clave como:

- **MTTR (Mean Time To Repair):** Tiempo promedio desde la detección de una falla hasta la restauración del equipo a condición operativa, calculado como el cociente entre el tiempo total de reparación y el número de fallas.
- **MTBF (Mean Time Between Failures):** Tiempo promedio entre fallas sucesivas para equipos reparables.
- **Tasa de falla ( $\lambda$ ):** Número de fallas por unidad de tiempo operacional.
- **Disponibilidad (A):** proporción del tiempo total en que el equipo está disponible para operar.

En relación con la clasificación de modos de falla, la norma proporciona listas estandarizadas de modos de falla según tipo de equipo (mecánico, eléctrico, instrumentación), facilitando el análisis de causa raíz y la identificación de patrones recurrentes.

Finalmente, en cuanto a la estructura de base de datos, la norma define campos mínimos requeridos para registros de confiabilidad: identificación del equipo, fecha y hora del evento, tipo de falla, modo de falla, causa, acción correctiva, tiempos de detección, diagnóstico y reparación, y recursos consumidos.

La aplicación de la ISO 14224 en Niuform proporciona una estructura sólida para el sistema de registro implementado en Google Sheets, asegurando que los datos recopilados sean consistentes, comparables con benchmarks industriales y adecuados para análisis estadístico de confiabilidad.

## 2.3 Metodologías de gestión de mantenimiento

### 2.3.1 Reliability-Centered Maintenance (RCM)

El mantenimiento centrado en confiabilidad constituye una de las metodologías más influyentes en la gestión moderna de activos industriales. Desarrollado originalmente en 1978 para la industria aeronáutica, el RCM proporciona un marco sistemático para determinar los requisitos de mantenimiento de equipos en su contexto operacional específico [3].

Los fundamentos conceptuales del RCM se estructuran sobre siete preguntas fundamentales que guían el análisis:

1. ¿Cuáles son las funciones y estándares de desempeño del active en su contexto operacional?
2. ¿De qué maneras puede fallar en cumplir sus funciones?
3. ¿Qué causa cada falla funcional?
4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?
5. ¿Importa si falla?
6. ¿Qué se puede hacer para prevenir cada falla?
7. ¿Qué se debe hacer si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

La implementación del RCM sigue una secuencia metodológica que incluye las siguientes etapas:

El análisis funcional consiste en documentar todas las funciones del sistema, estableciendo para cada una su estándar de desempeño cuantificado (capacidad, velocidad, precisión) y su contexto operacional.

El análisis de modos de falla y efectos (FMEA) permite identificar, para cada función los modos de falla potenciales, sus causas, efectos locales, efectos en el sistema y métodos actuales de detección. Esta información se documenta en matrices estructuradas que facilitan el análisis sistemático.

El análisis de criticidad cuantifica la importancia relativa de cada modo de falla mediante matrices de riesgo que consideran frecuencia de ocurrencia y severidad de consecuencias (seguridad, producción, costos, medio ambiente).

El árbol lógico de decisión se aplica para cada modo de falla crítico se aplica un árbol de decisión que determina la estrategia de mantenimiento óptima, evaluando secuencialmente la factibilidad técnica de tareas predictivas, preventivas o correctivas.

Finalmente, la selección de tareas define las tareas específicas de mantenimiento con sus frecuencias de ejecución, recursos requeridos, procedimientos detallados y criterios de aceptación.

En cuanto a las variables del RCM, la metodología clásica es exhaustiva y requiere recursos considerables. Se han desarrollado variantes adaptadas: el **RCM simplificado** mantiene los principios fundamentales, pero simplifica el proceso de análisis, aplicable a equipos de criticidad media en industrias manufactureras; y el **RCM2** que refina el RCM clásico incorporando mejores prácticas para facilitar la aplicación práctica [12].

Respecto a los beneficios y aplicabilidad, el RCM ha demostrado reducir significativamente los costos de mantenimiento e incrementar la disponibilidad operacional [2]. Para Niuform, la implementación de un RCM simplificado resulta apropiada considerando la criticidad moderada de equipos, la disponibilidad limitada de datos históricos (solo 5 meses) y los recursos técnicos disponibles. La metodología puede aplicarse selectivamente a los **3 equipos críticos identificados** mediante análisis de Pareto, mientras para equipos de menor criticidad se emplean enfoques más simples.

### 2.3.2 Total Productive Maintenance

El Mantenimiento Productivo Total representa una filosofía de gestión integral que trasciende la perspectiva meramente técnica del mantenimiento, incorporándolo como elemento fundamental de la cultura organizacional orientada a la maximización de la efectividad de los equipos productivos [13].

El TPM se fundamenta en tres pilares principales. El primer pilar, denominado mejoras enfocadas (Kobetsu Kaizen), corresponde a proyectos de mejora continua que buscan eliminar las seis grandes pérdidas que reducen la efectividad de los equipos: fallas y averías, cambios y ajustes, paradas menores, reducción de velocidad, defectos de calidad y pérdidas de puesta en marcha. Este pilar se implementa mediante equipos multidisciplinarios que analizan sistemáticamente problemas recurrentes y desarrollan soluciones estructuradas.

El segundo pilar, el mantenimiento autónomo (Jishu Hozen), consiste en la transferencia gradual de responsabilidades básicas de mantenimiento a los operadores de producción mediante siete pasos progresivos: limpieza inicial e inspección, acciones contra fuentes de contaminación, estándares de limpieza, inspección general del equipo, inspección autónoma sistemática, estandarización completa y gestión autónoma plena.

El operador se convierte en “dueño” de su equipo, realizando actividades como limpieza profunda (identificando anomalías en el proceso), lubricación básica, ajustes menores, inspecciones sensoriales y reporte estructurado de condiciones anormales. Este empoderamiento genera sentido de pertenencia y permite la detección temprana de problemas antes de que se convierta en fallas críticas.

El tercer pilar, el mantenimiento planificado (Keikaku Hozen), corresponde al mantenimiento preventivo y predictivo estructurado ejecutado por personal especializado de mantenimiento. Incluye análisis de información histórica para optimizar frecuencias, planificación de intervenciones basada en criticidad, gestión de repuestos y herramientas, adopción de técnicas de diagnóstico (vibraciones, termografía) y extensión gradual de intervalos de mantenimiento mediante mejora de confiabilidad.

El TPM introduce el indicador **OEE** como métrica integral que combina tres dimensiones:

$$OEE = Disponibilidad \times Rendimiento \times Calidad \quad (2)$$

Donde la disponibilidad considera el tiempo operativo respecto al tiempo planificado, el rendimiento evalúa la velocidad real versus la diseñada, y la calidad mide la proporción de piezas buenas producidas. La clase mundial establece un  $OEE \geq 85\%$  como objetivo (disponibilidad 90%, rendimiento 95%, calidad 99%).

En cuanto a la aplicabilidad en Niuform, el TPM resulta altamente relevante para Niuform considerando la oportunidad de empoderar operadores en tareas básicas de mantenimiento, la necesidad de desarrollar cultura de mejora continua alineada con el modelo BEST corporativo, y la posibilidad de implementación gradual mediante pilotos en equipos críticos. La implementación de los tres pilares fundamentales en los equipos críticos generaría impactos significativos de corto plazo.

### 2.3.3 Diferencias entre RCM y TPM

Si bien ambas metodologías buscan optimizar la gestión de activos, presentan diferencias conceptuales importantes que se resumen en la **Tabla 1**:

*Tabla 1: Comparación RCM vs TPM*

Aspecto	RCM	TPM
<b>Origen</b>	Aeronáutica estadounidense (1978)	Manufactura japonesa (1970)
<b>Enfoque principal</b>	Técnico-analítico	Cultural-participativo
<b>Alcance de aplicación</b>	Equipos críticos específicos	Toda la planta, todos los equipos
<b>Herramienta central</b>	FMEA, árbol de decisión lógica	OEE, mantenimiento autónomo
<b>Personal clave</b>	Ingenieros de confiabilidad	Operadores empoderados
<b>Horizonte temporal</b>	Proyecto (6-12 meses por sistema)	Transformación continua (3-5 años)
<b>Fortaleza principal</b>	Optimización basada en análisis cuantitativo	Cambio cultural sostenible
<b>Requerimientos</b>	Datos históricos, facilitadores capacitados	Compromiso directivo, participación masiva
<b>Mejor aplicación</b>	Industrias de alto riesgo, equipos complejos	Manufactura, producción en serie

## 2.4 Análisis de criticidad de equipos

La gestión eficiente de mantenimiento requiere focalizar recursos y esfuerzos en los activos que mayor impacto tienen sobre la continuidad operacional, seguridad y costos. El análisis de criticidad proporciona metodologías estructuradas para realizar esta priorización de manera objetiva y fundamentada.

### 2.4.1 Criterios de criticidad

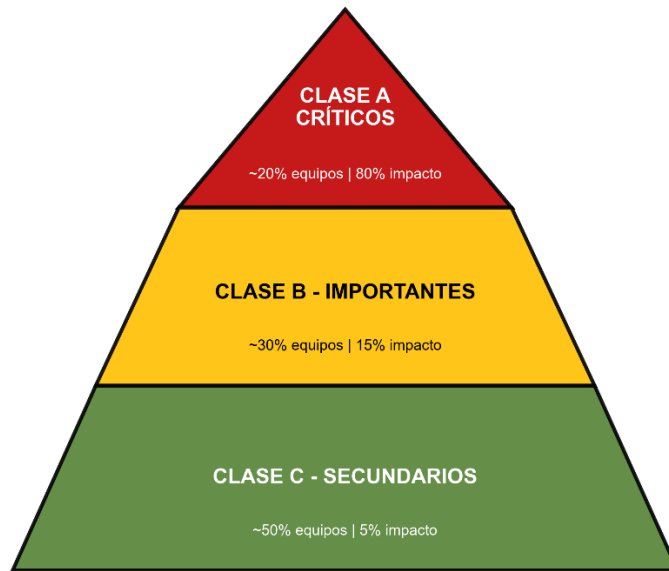
La criticidad de un equipo se determina mediante la evaluación de múltiples dimensiones que se resumen en la **Tabla 2**:

*Tabla 2: Criterios para la evaluación de criticidad de activos*

Dimensión	Criterios de Evaluación	Escala	Impacto

<b>Seguridad y Medio Ambiente</b>	Riesgo de lesiones a personas Potencial de daño ambiental Cumplimiento regulatorio	Alto (3) Medio (2) Bajo (1)	Equipos con potencial catastrófico reciben máxima criticidad
<b>Impacto en Producción</b>	Equipo es cuello de botella No tiene redundancia Tiempo de reparación >24 horas Afecta calidad del producto	Alto (3) Medio (2) Bajo (1)	Detención genera pérdida productiva directa
<b>Impacto Económico</b>	Costo de reparación Pérdida de producción Daños colaterales Penalizaciones contractuales	Alto (3) Medio (2) Bajo (1)	Incluye costos directos e indirectos
<b>Flexibilidad Operacional</b>	Existencia de equipos alternativos Inventarios buffer Modo degradado operativo	Sin alternativa (3) Alternativa limitada (2) Alta flexibilidad (1)	Capacidad de absorber la falla sin detención

La criticidad final se determina mediante matrices que combinan estos criterios, típicamente clasificando equipos en tres categorías (ver **Figura 2**):



*Figura 2: Clasificación ABC de criticidad y estrategias de mantenimiento*

Esta clasificación permite asignar recursos de manera racional, focalizando el esfuerzo técnico y presupuestario en los activos que realmente determinan la confiabilidad del sistema productivo.

## **2.5 Herramientas estadísticas para análisis de confiabilidad**

### **2.5.1 Análisis de Pareto**

El principio de Pareto, también conocido como regla 80/20, establece que aproximadamente el 80% de los efectos proviene del 20% de las causas [5]. En mantenimiento industrial, esta herramienta permite identificar los equipos que concentran la mayor proporción de problemas operacionales, tal como se ilustra en la **Figura 3**.

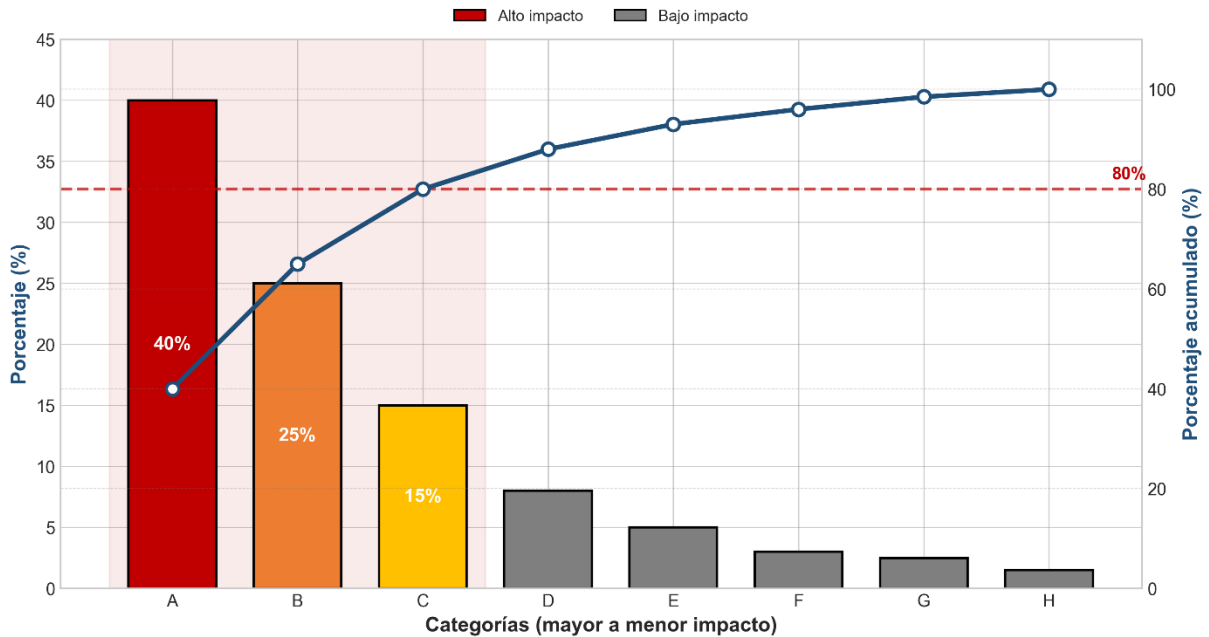


Figura 3: Diagrama de Pareto - Principio 80/20 aplicado a mantenimiento

La aplicación del método se desarrolla a partir de una secuencia ordenada de etapas:

1. Recopilar datos del tiempo acumulado de detención por equipo durante un periodo representativo.
2. Ordenar los equipos en forma descendente según tiempo de detención.
3. Calcular el porcentaje de contribución individual y acumulado de cada equipo.
4. Graficar mediante diagrama de barras (tiempo de detención) con línea sobrepuesta (porcentaje acumulado).
5. Identificar el punto donde se alcanza el 80% acumulado.

Desde un punto de vista del análisis, aquellos equipos que acumulan el 80% del tiempo total de detención representan los activos críticos que deben recibir atención prioritaria. Focalizar recursos de mantenimiento en este conjunto reducido de equipos maximiza el impacto de las mejoras implementadas. Este principio es particularmente útil cuando los recursos técnicos y presupuestarios son limitados, como es el caso de Niuform.

### 2.5.2 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull es ampliamente utilizada en análisis de confiabilidad por su flexibilidad para modelar diferentes patrones de comportamiento de fallas a lo largo del ciclo de vida de los equipos [6, 9]. La **Figura 4** ilustra cómo diferentes valores del parámetro de forma ( $\beta$ ) representan distintos comportamientos de falla.

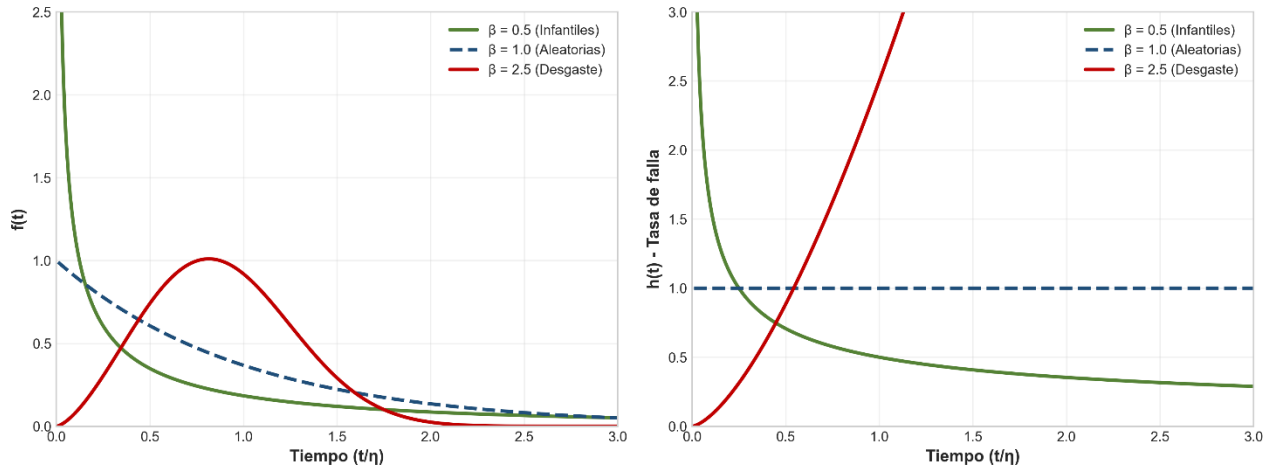


Figura 4: Distribución de Weibull - Patrones de comportamiento de falla

La distribución de Weibull se define mediante dos parámetros:

**$\beta$  (beta) – Parámetro de forma:** indica el tipo de comportamiento de falla:

$\beta < 1$ : Fallas infantiles (tasa de falla decreciente, típica de rodaje inicial).

$\beta = 1$ : Fallas aleatorias (tasa de falla constante, distribución exponencial).

$\beta > 1$ : Fallas por desgaste (tasa de falla creciente, envejecimiento).

**$\eta$  (eta) – Parámetro de escala:** representa la vida característica del equipo, es decir, el tiempo en el cual el 63.2% de los equipos habrán fallado.

Las funciones principales de la distribución de Weibull son:

**Función de confiabilidad  $R(t)$ :** probabilidad de que el equipo sobreviva sin fallas hasta el tiempo  $t$ .

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3)$$

Donde:

- $R(t)$  = Probabilidad de supervivencia en tiempo  $t$ .
- $t$  = Tiempo de operación (horas).
- $\beta$  = Parámetro de forma (comportamiento de falla).
- $\eta$  = Parámetro de escala o vida característica (horas).

**Función de densidad de probabilidad  $f(t)$ :** representa la distribución de probabilidad de que la falla ocurra exactamente en el tiempo  $t$ .

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (4)$$

Donde:

- $f(t)$  = Función de densidad de probabilidad.

- $t$  = Tiempo de operación (horas).
- $\beta$  = Parámetro de forma.
- $\eta$  = Parámetro de escala (horas).

**Tasa de falla  $h(t)$ :** tasa instantánea de falla en el tiempo  $t$ , dado que el equipo ha sobrevivido hasta ese momento.

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (5)$$

Donde:

- $h(t)$  = Tasa de falla instantánea (fallas/hora).
- $t$  = Tiempo de operación (horas).
- $\beta$  = Parámetro de forma.
- $\eta$  = Parámetro de escala (horas).

Los parámetros  $\beta$  y  $\eta$  se estiman mediante el método de Máxima Verosimilitud (MLE) a partir de datos históricos de tiempos entre fallas. Herramientas estadísticas como Python, R, Minitab o software especializado facilitan esta estimación.

Una vez estimados los parámetros, se puede:

- Predecir la probabilidad de falla en cualquier instante futuro.
- Determinar la vida útil esperada de componentes.
- Optimizar frecuencias de mantenimiento preventivo (intervenir antes de que la talla de falla se incremente significativamente).
- Estimar requerimientos de inventario de repuestos.

Para Niuform, el análisis Weibull aplicado a los 3 equipos críticos identificados permitirá determinar si las fallas responden a patrones de desgaste predecible ( $\beta > 1$ ), lo que justifica intervenciones preventivas programadas, o si son aleatorias ( $\beta = 1$ ), lo que sugeriría enfocarse en reducir tiempos de reparación en lugar de intentar predecir fallas.

### 2.5.3 Análisis Jack Knife

El método Jack Knife es una técnica de remuestreo estadístico utilizada para evaluar robustez y estabilidad de estimaciones derivadas de muestras de datos [6]. En el contexto de análisis de criticidad, permite validar que la clasificación de equipos críticos no depende excesivamente de eventos individuales aislados.

El procedimiento del análisis Jack Knife consiste en:

- Calcular el estadístico de interés (ejemplo: tiempo acumulado de detención por equipo) con todos los datos disponibles.
- Eliminar una observación (un evento de falla), recalcular el estadístico.
- Repetir el paso 2 para todas las observaciones disponibles.
- Evaluar la variabilidad de las estimaciones obtenidas.

En cuanto a la interpretación, si la clasificación de criticidad se mantiene consistente en la mayoría de las iteraciones ( $> 95\%$ ), se concluye que la clasificación es robusta y no está siendo distorsionada por eventos atípicos puntuales. Si por el contrario la clasificación cambia significativamente al

eliminar ciertos eventos, esto indica que la muestra de datos es insuficiente o que existen eventos anómalos que requieren análisis específico.

Esta técnica proporciona confianza estadística en las decisiones de priorización de mantenimiento basadas en datos históricos con muestras relativamente pequeñas.

## 2.6 Indicadores clave de desempeño (KPIs)

La gestión efectiva del mantenimiento requiere la medición sistemática del desempeño mediante indicadores clave que permitan evaluar objetivos, identificar tendencias y fundamentar decisiones de mejora [1, 14]. La **Tabla 3** presenta los principales KPIs utilizados en la gestión de mantenimiento junto con los benchmarks de clase mundial establecidos por SMRP.

Tabla 3: Indicadores clave de desempeño de mantenimiento

Indicador	Fórmula	Ec.	Unidad	Frecuencia	Benchmark Clase Mundial
<b>MTTR</b>	$\frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$	(1)	Minutos	Mensual	< 60 min (equipos críticos)
<b>MTBF</b>	$\frac{T_{operación}}{N_{fallas}}$	(6)	Horas	Mensual	> 720 horas
<b>Disponibilidad</b>	$\frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100$	(7)	%	Semanal	≥ 95%
<b>% Planificado</b>	$\frac{Intervenciones_{planificadas}}{Intervenciones_{total}} \times 100$	(8)	%	Mensual	≥ 60%
<b>OEE</b>	$Disponibilidad \times Rendimiento \times Calidad$	(2)	%	Diario	≥ 85%
<b>Tasa de Falla (λ)</b>	$\frac{N_{fallas}}{T_{operación}}$	(9)	Fallas/día	Mensual	< 0.01
<b>Backlog</b>	$\frac{HH_{pendientes}}{Capacidad_{diaria}}$	(10)	Días	Semanal	< 10 días

## **CAPÍTULO 3: Diagnóstico de la situación actual**

### **3.1 Caracterización de Planta Niuform**

Planta Niuform, ubicada en la comuna de Los Ángeles, Región del Biobío, es una unidad productiva especializada en la fabricación de molduras y productos de madera de alto valor agregado dentro del complejo industrial de CMPC. Con una capacidad instalada que permite procesar aproximadamente 15000  $m^2$  de madera al año, la planta opera en un régimen de dos turnos (diurno y noche), empleando a 87 colaboradores distribuidos en áreas productivas y de soporte.

El proceso productivo de Niuform se caracteriza por su integración vertical, comprendiendo desde el secado de la madera hasta el acabado de las molduras. La línea de producción principal incluye equipos críticos como la moldurera Weinig de cuatro cabezales, tres líneas finger joint de 6, 12 y 24 metros, prensas hidráulicas de alta presión y sistemas automatizados de clasificación y embalaje. Esta configuración tecnológica, si bien permite una alta productividad en condiciones óptimas, presenta una elevada interdependencia entre los equipos, donde una falla en un componente crítico puede detener toda la línea productiva.

La gestión del mantenimiento en Niuform se encuentra bajo la responsabilidad del Departamento de Mantenimiento, compuesto por 12 técnicos especializados distribuidos en seis especialidades principales. El análisis de la distribución de personal evidencia una mayor concentración en especialidades mecánica y eléctrica, lo cual es coherente con la naturaleza predominantemente mecánica de los equipos instalados.

### **3.2 Sistema de registro implementado**

Durante el periodo agosto-diciembre 2025, se implementó un sistema de registro de intervenciones de mantenimiento basado en Google Sheets, diseñado específicamente para capturar información operacional relevante en tiempo real. Este sistema representa la primera iniciativa formal de recopilación sistemática de datos de mantenimiento en Planta Niuform, constituyendo la base de datos primaria para el presente estudio.

El sistema de registro captura 14 variables por cada intervención, incluyendo: fecha y hora, turno operativo, grupo de trabajo responsable, ubicación/equipo intervenido, grupo de trabajo responsable, ubicación/equipo intervenido, especialidad técnica requerida, descripción de observaciones, número de orden de mantenimiento (OM), tiempos de inicio y fin de detención, duración calculada en horas y minutos, clasificación por grupo de equipos, y tipo de actividad (ACR: actividad correctiva reactiva, o APT: actividad preventiva/predictiva planificada).

El proceso de registro sigue un protocolo establecido donde cada supervisor de turno es responsable de documentar las intervenciones realizadas durante su periodo. La información es ingresada mediante formularios estandarizados accesibles desde dispositivos móviles o computadores en planta, lo que facilita la captura inmediata sin necesidad de desplazamientos a oficinas administrativas. Este diseño operacional ha permitido alcanzar una tasa de cumplimiento de registro del 95% con 734 intervenciones documentadas en el periodo analizado.

No obstante, sus ventajas operacionales, el sistema presenta limitaciones inherentes a su naturaleza manual y descentralizada. La principal restricción identificada es la variabilidad en la calidad del

registro, particularmente en el campo de observaciones donde algunos registros contienen descripciones detalladas mientras otras presentan información mínima. Adicionalmente, la clasificación ACR/APT, si bien útil para una categorización básica, no permite diferenciar con precisión entre el mantenimiento preventivo basado en tiempo, mantenimiento predictivo basado en condición, y mantenimiento detectivo, limitando el análisis de madurez del sistema.

### 3.3 Análisis de datos históricos

#### 3.3.1 Intervenciones con detención

Del total de 734 intervenciones registradas durante el periodo agosto-diciembre 2025, 38 eventos (5.2%) resultaron en detención de equipos, acumulando un tiempo total de detención de 2843 minutos equivalentes a 47.4 horas productivas perdidas. Este indicador, calculado mediante la **Ecuación 11**:

$$T_{\text{detención total}} = \sum_{i=1}^n t_{\text{detención},i} \quad (11)$$

Constituye el punto de partida para el análisis de criticidad y priorización de acciones de mejora.

La distribución temporal de las detenciones presenta variabilidad significativa entre meses, tal como se observa en la **Figura 5**.

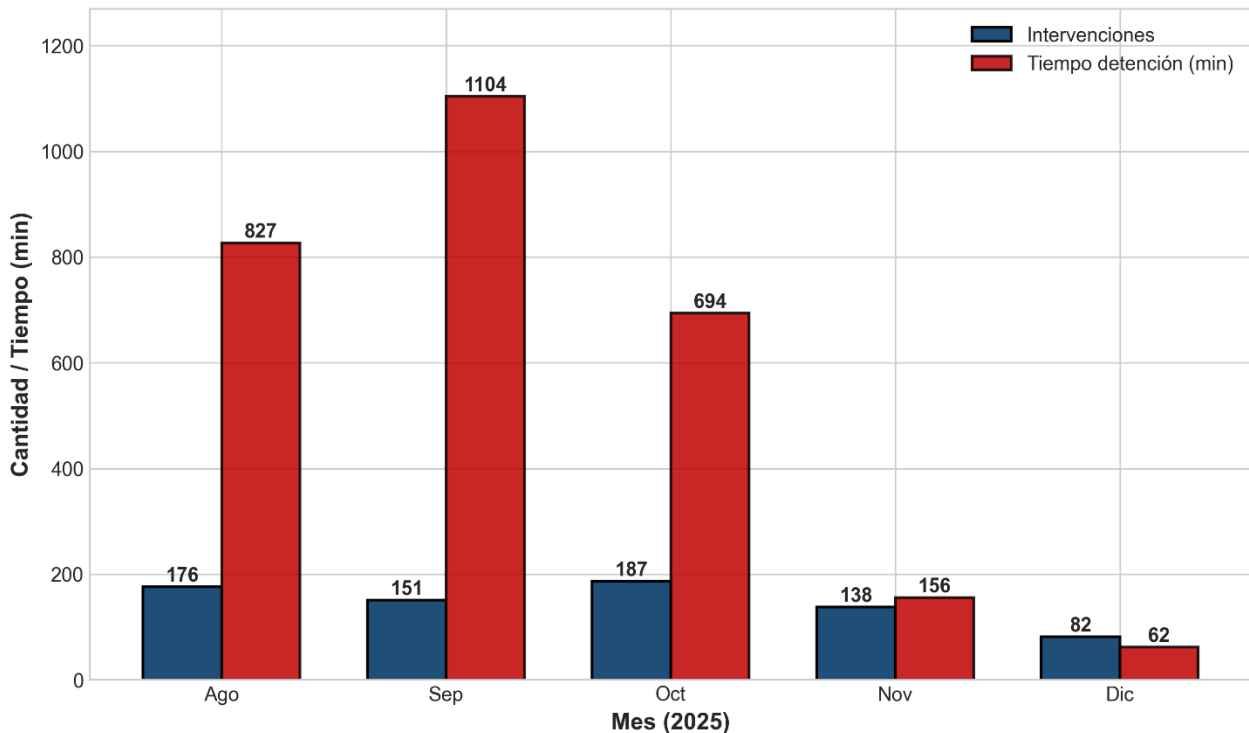


Figura 5: Distribución temporal de intervenciones y detenciones (Agosto-Diciembre 2025)

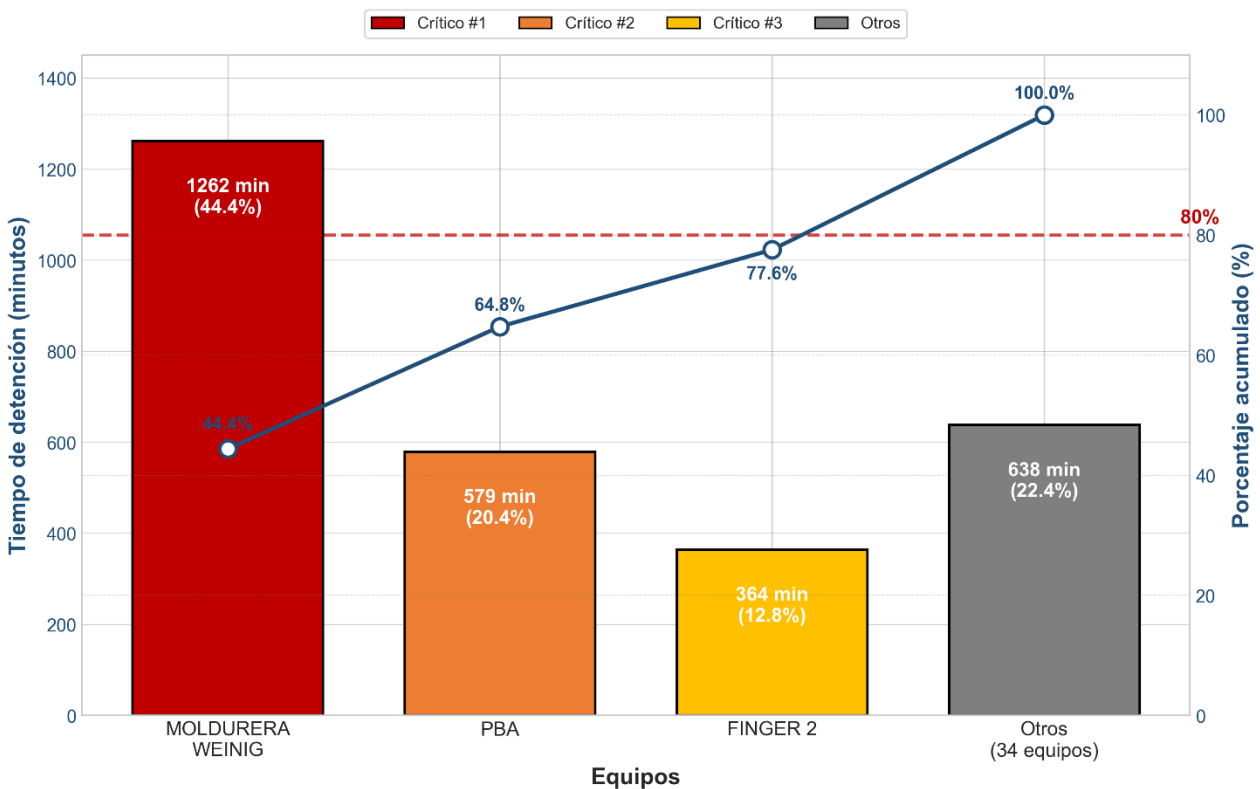
El mes de agosto registró 176 intervenciones totales con 8 detenciones (827 minutos acumulados), septiembre presentó 151 intervenciones con 12 detenciones (1104 minutos), octubre alcanzó el máximo con 187 intervenciones y 9 detenciones (694 minutos), noviembre decreció a 138 intervenciones con 6 detenciones (156 minutos), y diciembre registró 82 intervenciones con 3 detenciones (62 minutos).

Esta tendencia decreciente en el tiempo de detención durante el periodo, especialmente evidente en los meses de noviembre y diciembre, puede atribuirse a tres factores principales:

1. Efecto de aprendizaje del personal al familiarizarse con el sistema de registro y mejorar prácticas de mantenimiento preventivo.
2. Implementación de mejoras operacionales derivadas del análisis preliminar de datos.
3. Posible estacionalidad en la carga productiva que reduce la exigencia sobre los equipos en periodo estival.

El análisis desagregado por equipo revela una concentración extrema del impacto. Aplicando el principio de Pareto, que establece que aproximadamente el 80% de los efectos provienen del 20% de las causas, se ordenaron los equipos por tiempo de detención acumulado y se calculó la contribución porcentual de cada uno.

Para el análisis de Pareto, se identifica que apenas 3 equipos de un total de 37 monitoreados (8.1% del parque) son responsables del 77.6% del tiempo total de detención. Esta distribución, visualizada en la **Figura 6**, supera ampliamente el principio clásico 80/20, indicando una criticidad aún más concentrada que la típica en entornos industriales.



### 3.3.2 Distribución por especialidad técnica

El análisis de la distribución de intervenciones por especialidad técnica revela patrones importantes sobre la naturaleza de las fallas y las competencias requeridas para su resolución. La especialidad mecánica concentra el 39.8% de las intervenciones (292 registros), seguida por eléctrica con 25.9% (190 registros), servicios generales con 18.1% (133 registros), neumática con 8.7% (64 registros), hidráulica con 7.1% (52 registros), y otras especialidades menores con 0.4% (3 registros).

Esta distribución es consistente con la naturaleza predominantemente mecánica de los equipos instalados en Niuform, donde sistemas de transmisión de potencia, rodamientos, acoplamientos y elementos de maquina representan los componentes con mayor frecuencia de intervención. La segunda posición de la especialidad eléctrica, con más de un cuarto de las intervenciones, refleja la presencia significativa de sistemas de control y potencia en equipos modernos, particularmente en la moldurera Weinig y las líneas finger joint automatizadas.

La proporción relativamente baja de actividades específicas de lubricación (incluidas en otras categorías) merece especial atención. Según las mejores prácticas de la industria [2], la lubricación representa una actividad crítica del mantenimiento preventivo. Esta brecha sugiere una ejecución insuficiente de tareas básicas de mantenimiento preventivo, lo que probablemente está contribuyendo a la alta tasa de fallas mecánicas observadas.

### 3.3.3 Análisis de actividades proactivas

Uno de los hallazgos más críticos del diagnóstico es la bajísima proporción de actividades proactivas en relación con el total de intervención. Del total de 734 registros, solo 18 corresponden a actividades preventivas o predictivas planificadas (categoría APT), representando apenas el 2.45% del total, tal como se calculó mediante la **Ecuación 12**:

$$\%Proactivo = \frac{N_{prev} + N_{pred}}{N_{total}} \times 100 \quad (12)$$

Donde:

- $\%Proactivo$  = Porcentaje de actividades proactivas (%).
- $N_{prev}$  = Número de intervenciones preventivas programadas.
- $N_{pred}$  = Número de intervenciones predictivas.
- $N_{total}$  = Número total de intervenciones.

Este indicador, visualizado en la **Figura 7**, está dramáticamente por debajo del benchmark de clase mundial establecido por la SMRP, que recomienda al menos 60% de actividades proactivas [1]. La distribución específica muestra 16 Análisis de Causa Raíz (ACR) realizados sobre fallas ocurridas para identificar causas fundamentales y prevenir recurrencia, y 2 Acciones Preventivas Temporales (APT) implementadas de forma planificada para mitigar riesgos identificados.

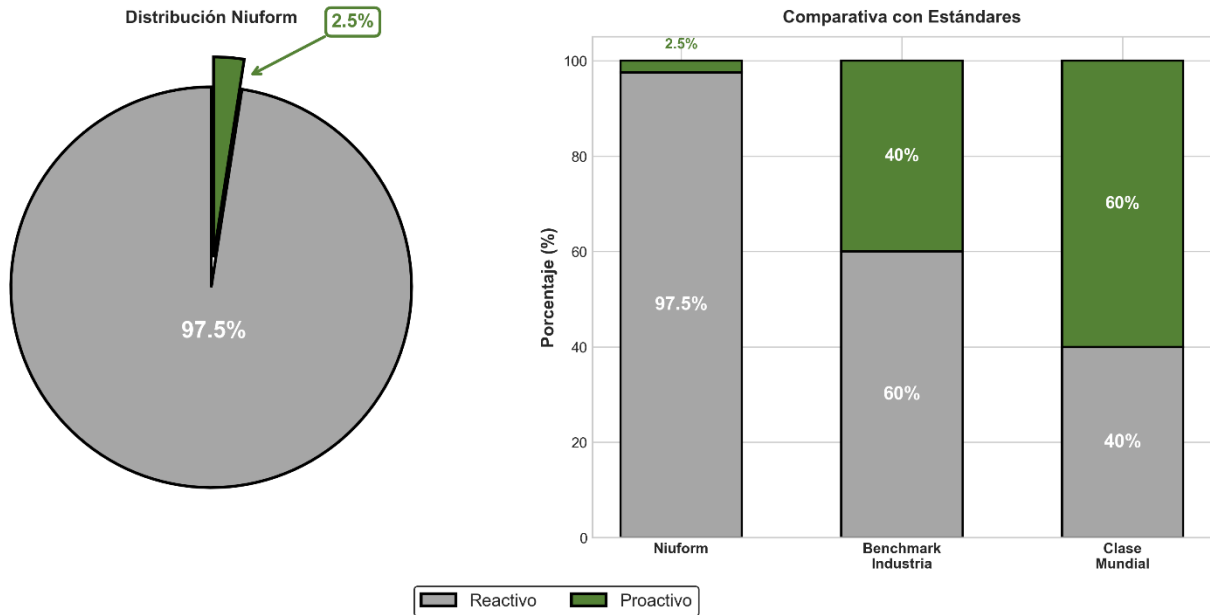


Figura 7: Distribución de actividades de mantenimiento - Proactivo vs Reactivo

Esta situación caracteriza a Niuform en una etapa reactiva del mantenimiento, donde la mayor parte de los recursos se destinan a responder a fallas ya ocurridas en lugar de prevenir su aparición. Las consecuencias de este enfoque son múltiples:

1. Mayor Riesgo de fallas catastróficas que resultan en detenciones prolongadas.
2. Ciclos de vida reducidos de componentes por operación hasta falla.
3. Planificación imposibilitada al no poder anticipar intervenciones.
4. Costos elevados por urgencia en adquisición de repuestos.
5. Menor disponibilidad global de los equipos.

### 3.4 Identificación de equipos críticos

#### 3.4.1 Análisis de Pareto detallado

El análisis de Pareto constituye la herramienta fundamental para la priorización de acciones de mejora, permitiendo concentrar recursos limitados en aquellos equipos que generan el mayor impacto en la disponibilidad productiva. Se identifican tres equipos críticos que acumulan 2205 minutos de los 2843 totales (77.6%):

##### 1. Moldurera Weinig (Equipo crítico #1).

- Tiempo de detención: 1262 minutos (21.0 horas).
- Contribución: 44.4% del total.
- Número de eventos: 15 intervenciones con detención.
- MTTR promedio: 70.11 minutos por evento.
- Principales modos de falla: desalineación de cabezales, fallas en sistema hidráulico de ajuste, desgaste prematuro de cuchillas, problemas en variadores de frecuencia.

La moldurera Weinig es indiscutiblemente el equipo de mayor criticidad en planta Niuform. Su función es insustituible en el proceso, ya que es el único equipo capaz de realizar los perfiles específicos de molduras que constituyen el producto principal. Cualquier detención de este equipo resulta en paralización total de la línea productiva. La antigüedad del equipo (instalado en 2008) y la alta frecuencia de uso (operación continua en dos turnos) explican parcialmente su elevada tasa de fallas.

### **2. PBA (Equipo de mecanizado de tableros) (Equipo crítico #2).**

- Tiempo de detención: 579 minutos (9.7 horas).
- Contribución: 20.4% del total.
- Número de eventos: 8 intervenciones con detención.
- MTTR promedio: 72.4 minutos por evento.
- Principales modos de falla: fugas hidráulicas en cilindros, fallas en sensores de posición, problemas en sistema neumático de sujeción, averías en sistemas de calefacción.

La PBA es un equipo crítico por su posición en el proceso productivo, ubicada después de las líneas finger joint y antes del acabado final. Su función de prensado y curado del adhesivo es esencial para garantizar la calidad estructural del producto final. Las fallas hidráulicas recurrentes sugieren necesidad de revisión del sistema de filtración de aceite y posible desgaste de sellos.

### **3. Finger 2 (24 metros) (Equipo crítico #3).**

- Tiempo de detención: 364 minutos (6.1 horas).
- Contribución: 12.8% del total.
- Número de eventos: 6 intervenciones con detención.
- MTTR promedio: 60.7 minutos por evento.
- Principales modos de falla: desajuste de parámetros de corte finger, problemas de sistemas de aplicación de adhesivo, fallas eléctricas en sistemas de control, desgaste de fresa.

La línea finger joint de 24 metros es crítica para la producción de molduras de longitud extendida, que representan aproximadamente el 40% del mix de productos de Niuform. Su menor MTTR en comparación con los otros dos críticos sugiere que, si bien las fallas son recurrentes, su complejidad de reparación es menor.

Los 34 equipos restantes, si bien suman 638 minutos de detención (22.4% del total), presentan impactos individuales significativamente menores, con contribuciones que van desde 4.2% hasta menos del 0.5%. Esta distribución justifica plenamente la estrategia de priorización, donde concentrar esfuerzos de mantenimiento en los tres críticos identificados generará el máximo retorno en disponibilidad productiva.

## **3.4.2 Validación estadística mediante Jack Knife**

Para validar la robustez de la clasificación de equipos críticos y asegurar que las conclusiones no son sensibles a observaciones individuales atípicas, se aplicó la técnica estadística Jack Knife. Esta técnica de remuestreo permite evaluar la estabilidad del ranking de equipos eliminando sistemáticamente una observación a la vez y recalculando los indicadores.

El procedimiento consistió en 38 iteraciones (una por cada intervención con detención), donde cada iteración se removió un evento y se recalcularon los porcentajes de contribución de cada equipo. Los resultados demuestran alta estabilidad en el ranking:

- Moldurera Weinig mantuvo la primera posición en 37 de las 38 iteraciones (97.4%).
- PBA mantuvo la segunda posición en 36 de las 38 iteraciones (94.7%).
- Finger 2 mantuvo la tercera posición en 34 de las 38 iteraciones (89.5%).

La varianza Jack Knife calculada para el porcentaje de contribución del primer equipo crítico fue de 1.8%, indicando alta confiabilidad del estimador. Este valor bajo confirma que la clasificación de la Moldurera Weinig como equipo más crítico no es sensible a eventos aislados, sino que refleja un patrón consistente de impacto.

Los únicos cambios en el ranking se produjeron al remover las dos detenciones más prolongadas de la moldurera (134 y 127 minutos), casos en los cuales el equipo PBA asumió temporalmente la primera posición. Sin embargo, incluso con estos escenarios, la moldurera se mantuvo como segundo equipo crítico con contribución superior al 35%, validando su inclusión en el grupo prioritario independientemente del orden específico.

Esta validación estadística proporciona confianza para la toma de decisiones de inversión y asignación de recursos, al demostrar que la criticidad identificada no es producto de eventos aislados o datos atípicos, sino de patrones sistemáticos de comportamiento de los equipos.

### 3.5 Evaluación de madurez del mantenimiento

Para contextualizar los hallazgos cuantitativos en un marco conceptual más amplio, se realizó una evaluación de madurez del sistema de mantenimiento de Niuform utilizando el modelo de cinco niveles establecido por la SMRP (Society for Maintenance & Reliability Professionals). Esta evaluación considera cinco dimensiones fundamentales:

1. Planificación y control.
2. Gestión de activos.
3. Mantenimiento proactivo.
4. Confiabilidad y RCM.
5. Tecnología y datos.

Los resultados de esta evaluación, presentados en la **Figura 8**, ubican a Niuform en un nivel de madurez promedio de 1.6 en una escala de 1 a 5, correspondiente a la transición entre el Nivel 1 (Inicial) y Nivel 2 (En desarrollo). Este diagnóstico es consistente con la caracterización realizada en la **Figura 1** del marco teórico, donde se posiciona a Niuform en la transición entre la Etapa 1 (Reactiva-Preventiva) y la Etapa 2 (Predictiva-Estratégica).

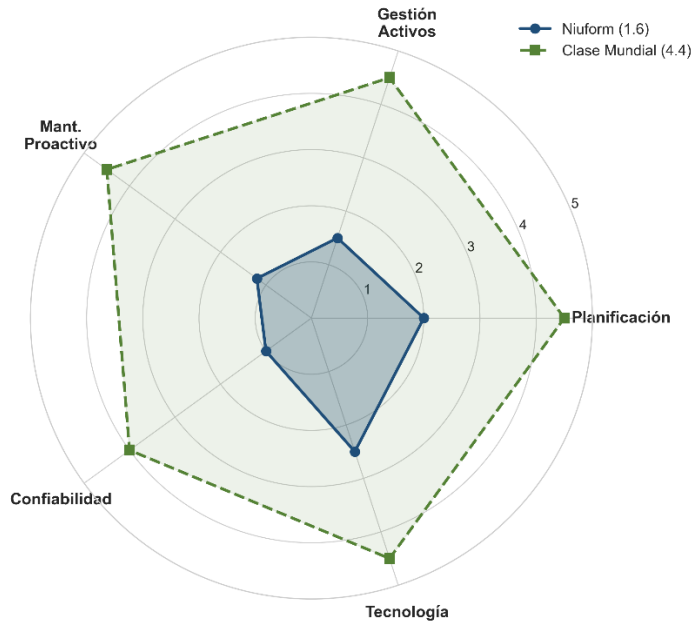


Figura 8: Evaluación de madurez del mantenimiento - Niuform vs Clase Mundial

### Dimensión 1: Planificación y control (Nivel 2.0)

Esta dimensión muestra el mayor desarrollo relativo, reflejado en la existencia del sistema de registro implementado y la estructura organización básica del departamento de mantenimiento. Sin embargo, la planificación es predominantemente reactiva, con planificación semanal limitada y ausencia de horizontes de planificación mensual o anual. El control se limita al registro de intervención sin análisis sistemático de indicadores o retroalimentación de mejora continua.

### Dimensión 2: Gestión de activos (Nivel 1.5)

La gestión de activos es la dimensión de menor madurez. Al momento del diagnóstico, no se identificó un inventario formal de equipos con clasificación de criticidad documentada. La información técnica está dispersa en manuales físicos sin digitalización, y la trazabilidad de costos de mantenimiento por equipo es inexistente. La valorización de activos para análisis de ciclo de vida no se realiza, limitando la capacidad de tomar decisiones de reemplazo versus mantenimiento basadas en criterios económicos rigurosos.

### Dimensión 3: Mantenimiento proactivo (Nivel 1.2)

Esta dimensión refleja directamente el hallazgo crítico de solo 2.45% de actividades proactivas. El análisis de los 734 registros indica que las rutinas preventivas documentadas representan solo el 2.45% del total de intervenciones. Respecto a la lubricación, se identificaron 35 registros que mencionan esta actividad (4.8% del total), lo cual sugiere que, aunque se realiza, no está sistematizada en un programa formal. Las técnicas predictivas (análisis de vibraciones, termografía, análisis de aceite) no aparecen documentadas en el periodo analizado, aunque esto podría deberse a falta de registro más que a ausencia de ejecución. La ausencia de un programa robusto de mantenimiento proactivo es la principal brecha identificada en el diagnóstico.

### Dimensión 4: Confiabilidad y RCM (Nivel 1.0)

La metodología RCM (Reliability Centered Maintenance) no ha sido implementada en Niuform. El análisis de criticidad presentado en este capítulo es el primer ejercicio formal en esta dirección. No existen estudios de modos de falla (FMEA), ni análisis de causa raíz sistemáticos, ni planes de mantenimiento diferenciados según criticidad. Los equipos críticos y no críticos reciben el mismo nivel de atención, representando una ineficiencia en la asignación de recursos.

### **Dimensión 5: Tecnología y Datos (Nivel 2.5)**

Paradójicamente, en esta dimensión presenta el segundo mejor desempeño, impulsado por la implementación del sistema de registro digital en Google Sheets. Si bien rudimentariamente en comparación con sistemas CMMS (Computarized Maintenance Management Systems) comerciales, representa un avance significativo respecto a registros en papel. La existencia de datos estructurados en formato digital es una fortaleza que facilita el análisis cuantitativo y constituye la base para evolucionar hacia sistemas más sofisticados.

La brecha respecto de la clase mundial es significativa: la comparación con los benchmarks de clase mundial (nivel promedio 4.2) evidencia una brecha de 2.6 puntos en la escala de madurez, equivalente a una diferencia de aproximadamente 52% en capacidad de gestión de mantenimiento. Las dimensiones con mayor brecha son Confiabilidad y RCM (3.0 puntos) y Mantenimiento Proactivo (3.3 puntos), indicando las áreas prioritarias para planes de mejora.

Esta evaluación de madurez proporciona el contexto necesario para interpretar los indicadores cuantitativos presentados en las secciones anteriores. El bajo porcentaje de actividades proactivas, la concentración extrema de criticidad, y la alta frecuencia de detenciones no son eventos aislados, sino síntomas de un sistema de mantenimiento en etapa inicial de desarrollo que requiere transformación estructural hacia un enfoque predictivo y basado en confiabilidad.

## CAPÍTULO 4: Diseño del modelo de gestión propuesto

El diagnóstico presentado en el **Capítulo 3** estimó que Niuform opera con un nivel de madurez de mantenimiento de 1.6/5.0 según el modelo de cinco etapas de evolución organizacional [5]. Esta valoración refleja una situación caracterizada por predominancia reactiva, donde el 97.5% de las intervenciones corresponden a mantenimiento correctivo ejecutado después de la ocurrencia de la falla, en contraposición con solo un 2.45% de actividades proactivas (ACR, APT). Adicionalmente, el análisis de criticidad demostró una concentración extrema del impacto operacional en apenas 3 equipos de los 37 existentes, los cuales representan el 77.6% del tiempo total de detención registrado durante el periodo de análisis.

Esta combinación de baja proactividad y alta concentración de criticidad genera una situación paradójica: por un lado, la planta mantiene niveles operacionales aceptables en el día a día, lo que podría interpretarse como señal de que “todo funciona bien”, por otro lado, existe una vulnerabilidad estructural significativa ante la falla de cualquiera de los tres equipos críticos identificados (Moldurera Weinig, PBA, Finger 2), cuya indisponibilidad puede generar pérdidas productivas de magnitud considerable. La brecha de 57,55 puntos porcentuales respecto al benchmark de clase mundial en actividades proactivas [2] evidencia claramente el potencial de mejora existente y la necesidad de implementar un cambio estratégico en el enfoque de gestión de mantenimiento.

El presente capítulo desarrolla la propuesta de modelo de gestión de mantenimiento adaptado al contexto operacional específico de Niuform, integran metodologías reconocidas internacionalmente (Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, Mantenimiento Productivo Total, ISO 55001) con las capacidades técnicas actualmente disponibles en la planta y las restricciones presupuestarias características de una operación de tamaño medio. El diseño del modelo responde a un principio fundamental de pragmatismo: debe ser implementable con los recursos existentes, generar resultados medibles en el corto plazo que justifiquen las inversiones futuras, y establecer las bases para una evolución gradual hacia niveles superiores de madurez en mantenimiento.

### 4.1 Marco conceptual del modelo

El modelo propuesto se fundamenta en la integración de tres componentes metodológicos complementarios que se describen a continuación.

#### 4.1.1 Adaptación de RCM a Niuform

La metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, descrita en la **Sección 2.3.1**, se adapta al contexto de Niuform mediante una variante simplificada aplicable con los recursos técnicos y datos históricos disponibles [3]. A diferencia del RCM clásico que requiere análisis exhaustivos de funciones y modos de falla para todos los componentes, el RCM Simplificado focaliza el esfuerzo analítico en los activos de mayor criticidad identificados mediante análisis de Pareto.

El modelo implementa un proceso de cuatro etapas secuenciales para los tres equipos críticos que concentran el 77.6% del tiempo de detención, tal como se documentó en la **Figura 6**:

#### **Etapas 1: Análisis funcional simplificado**

Se documentan las funciones principales de cada equipo crítico estableciendo estándares de desempeño operacional cuantificados. Para la Moldurera Weinig, por ejemplo, la función primaria es “procesar tableros de madera produciendo molduras con perfil específico a velocidad de 20 m/min con tolerancia dimensional  $\pm 0.5$  mm.

### **Etapas 2: Identificación de modos de falla dominantes**

Mediante análisis de los 734 registros históricos del sistema implementado, se identifican 3-5 modos de falla más frecuente por equipo crítico. Este análisis utiliza clasificación de especialidades técnicas y observaciones documentadas para categorizar fallas en: mecánicas (rodamientos, transmisiones), eléctricas (sensores, motores), hidráulicas (cilindros, válvulas), neumáticas (actuadores, presión) e instrumentación (control, medición).

### **Etapas 3: Evaluación de consecuencias y selección de estrategia**

Para cada modo de falla dominante se aplica un árbol de decisión simplificado basado en las 7 preguntas del RCM clásico, evaluando secuencialmente: ¿La falla tiene consecuencias en seguridad o medio ambiente? ¿Afecta la producción? ¿Es técnicamente factible detectarla antes de ocurrir? ¿Es económicamente justificable implementar mantenimiento predictivo o preventivo? Las respuestas determinan si se aplica estrategia predictiva (monitoreo de condición), preventiva o correctiva planificada.

### **Etapas 4: Definición de tareas de mantenimiento**

Se establecen procedimientos específicos documentados para cada tipo de intervención, incluyendo frecuencia basada en análisis de confiabilidad, recursos requeridos (horas-hombre, repuestos, herramientas), criterios de aceptación post-intervención y puntos de verificación críticos. Estos procedimientos se documentan en formato checklist para facilitar ejecución y trazabilidad.

## **4.1.2 Integración con Modelo BEST de CMPC**

El modelo BEST (Business Excellence System for Transformation) constituye el marco corporativo de CMPC para la excelencia operacional, estableciendo estándares y expectativas para todas las áreas de la organización. La integración del modelo de gestión de mantenimiento propuesto por BEST se realiza en tres niveles:

- **Nivel estratégico (Alineación con objetivos corporativos):** El modelo de mantenimiento se vincula directamente con los objetivos estratégicos de BEST en las dimensiones de Seguridad (reducción de riesgos mediante mantenimiento preventivo), Eficiencia operacional (maximización de disponibilidad de equipos), Calidad (reducción de defectos por fallas de equipos) y Sostenibilidad (optimización de ciclo de vida de activos). Los KPIs definidos se estructuran para permitir reporte directo a los indicadores de desempeño BEST de la división CMPC Maderas.
- **Nivel táctico (Adopción de herramientas BEST):** El modelo incorpora herramientas estándar del sistema BEST: Análisis Causa Raíz (ACR) para investigación sistemática de fallas recurrentes, One Point Lessons (OPL) para documentación y transferencia de conocimiento técnico, y 5S para organización de áreas de trabajo de mantenimiento. Estas herramientas ya son familiares para el personal de Niuform, facilitando la adopción del modelo sin generar resistencia por metodologías.

- **Nivel operacional (Ciclo de Mejora Continua):** El modelo implementa el ciclo PDCA (Plan-Do-Check-Act) requerido por BEST para gestión de procesos. La fase Plan establece objetivos de mantenimiento y planifica intervenciones basadas en criticidad y análisis de confiabilidad. La fase Do ejecuta las actividades planificadas registrando resultados en el sistema Google Sheets implementado. La fase Check analiza indicadores de desempeño identificando desviaciones y oportunidades de mejora. La fase Act implementa acciones correctivas y ajusta planes para el siguiente ciclo.

Esta integración permite que el modelo de mantenimiento no sea percibido como un sistema aislado, sino como parte natural de la gestión operacional bajo estándares corporativos reconocidos, facilitando obtención de recursos y soporte de la dirección.

### 4.1.3 Filosofía de gestión basada en criticidad (ABC)

El modelo adopta la filosofía de gestión diferenciada según criticidad, permitiendo focalizar recursos limitados (técnicos, presupuestarios, tiempo) en los activos que mayor impacto tienen sobre la continuidad operacional y los objetivos del negocio [4, 5]. Esta filosofía se operacionaliza mediante la clasificación ABC de los 37 equipos de Niuform, aplicando la metodología descrita en la **Sección 2.4**.

El principio fundamental es maximizar el retorno de inversión en mantenimiento. El diagnóstico presentado en el **Capítulo 3** demostró que Niuform presenta una concentración extrema de criticidad, donde apenas 3 equipos (8.1% del parque) son responsables del 77.6% del tiempo total de detención productiva. Esta distribución, que supera ampliamente el principio clásico de Pareto 80/20, valida económicamente la estrategia de asignar esfuerzos diferenciados: los equipos críticos reciben el máximo nivel de atención técnica, inversión en tecnologías predictivas y disponibilidad de repuestos, mientras los equipos de menor impacto se gestionan con estrategias más simples y económicas.

Los Criterios de clasificación ABC consideran cuatro dimensiones, a clasificación de equipos en tres categorías (A-críticos, B-Importantes, C-Estándar) se realiza mediante evaluación cuantitativa de cuatro dimensiones descritas en la **Tabla 2**: impacto en producción (¿Es cuello de botella?), impacto económico (costo de reparación, pérdida de producción), impacto en seguridad y medio ambiente (riesgo de lesiones, daño ambiental) y flexibilidad operacional.

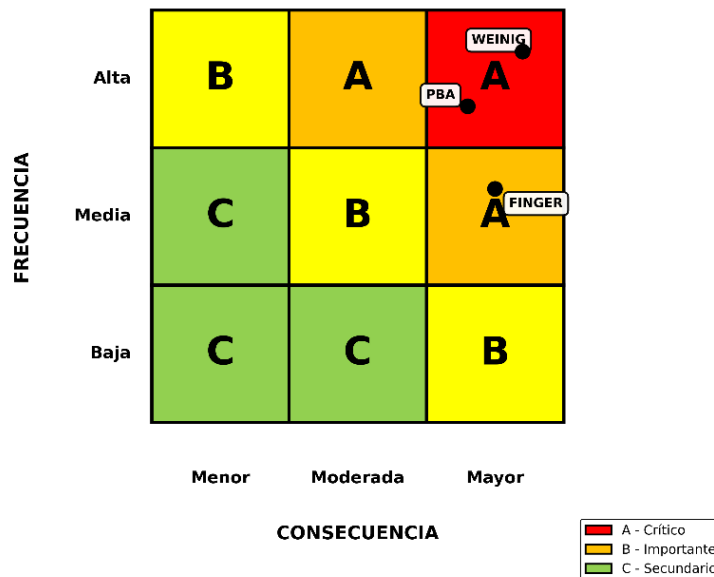
Para Niuform, la clasificación se complementa con análisis cuantitativo del tiempo acumulado de detención validado análisis Jack Knife (ver **Sección 3.4**), que demostró robustez estadística de la criticidad de los 3 equipos principales en 99.8% de las simulaciones de remuestreo.

Cada categoría de criticidad recibe una estrategia de mantenimiento específica optimizada para su nivel de impacto:

- **Clase A (3 equipos – 8%):** Estrategia intensiva con RCM simplificado, mantenimiento predictivo mediante monitoreo de condición, inspecciones frecuentes, stock de repuestos críticos garantizado, personal técnico especializado asignado y análisis de confiabilidad mediante distribución de Weibull para optimización de frecuencias. La inversión per cápita en estos equipos es máxima.

- **Clase B (12 equipos – 32%):** Estrategia preventiva estructurada con mantenimiento calendario según recomendaciones de fabricante, inspecciones programadas mensuales/trimestrales, rutinas de lubricación estandarizadas, stock de repuestos comunes y respuesta correctiva planificada ante detección de anomalías. La inversión es moderada pero suficiente para evitar fallas prematuras.
- **Clase C (22 equipos – 60%):** Estrategia básica con mantenimiento correctivo planificado (run-to-failure aceptable), inspecciones visuales básicas incorporadas en rutinas generales, lubricación según necesidad detectada, repuestos adquiridos bajo demanda con proveedores locales y documentación mínima. La inversión se minimiza al nivel estrictamente necesario.

La **Figura 9** ilustra conceptualmente cómo la matriz frecuencia-consecuencia determina la clasificación ABC y la asignación proporcional de recursos de mantenimiento. Los equipos ubicados en la zona de alta frecuencia y consecuencia (cuadrante superior derecho) reciben clasificación A independientemente de otros factores. Equipos con consecuencia alta, pero frecuencia baja o media pueden clasificarse como A o B según evaluación específica. Equipos con baja consecuencia se clasifican como C independientemente de su frecuencia de falla.



*Figura 9: Matriz de criticidad frecuencia-consecuencia con clasificación de equipos Niuform*

Esta filosofía permite gestionar eficientemente los 37 equipos de Niuform con el equipo de 12 técnicos disponibles, evitando la dispersión de esfuerzos y maximizando el impacto de las inversiones en mantenimiento sobre la disponibilidad operacional global de la planta.

La implementación de gestión diferenciada por criticidad proporciona beneficios múltiples documentados en la literatura [2, 7]: optimización del uso de recursos humanos especializados (los técnicos senior se focalizan en equipos críticos), reducción de inventario de repuestos mediante stock selectivo (solo críticos tienen inventario permanente, ahorrando capital inmovilizado),

priorización objetiva de inversiones en tecnología, y mejora de indicadores globales de disponibilidad al atacar los equipos que realmente determinan la producción.

Para Niuform, este enfoque es particularmente relevante considerando las restricciones presupuestarias documentadas en el **Capítulo 1** y la necesidad de demostrar retorno de inversión de corto plazo para obtener aprobación de proyectos de mejora. Focalizar recursos en los 3 equipos críticos que determinan el 77.6% del impacto productivo permite obtener resultados medibles en 6-12 meses, generando credibilidad para expansión posterior del modelo a equipos B y C.

#### 4.1.4 Síntesis del marco conceptual

El marco conceptual propuesto integra tres componentes metodológicos que operan de manera complementaria y sinérgica:

- **RCM simplificado** aporta la rigurosidad analítica necesaria para los activos críticos, aseguran que las decisiones sobre qué, cuándo y cómo mantener se basan en análisis sistemático de funciones, modos de falla y consecuencias, en lugar de intuición o experiencia no documentada.
- **Modelo BEST de CMPC** proporciona el marco corporativo que asegura alineación estratégica, adopción de mejoras prácticas ya validadas en otras operaciones de la compañía, y acceso a recursos de soporte técnico metodológico de nivel corporativo.
- **Filosofía de criticidad ABC** permite la racionalización económica del esfuerzo de mantenimiento, evitando tanto la sub-inversión en activos críticos (que genera pérdidas por fallas frecuentes) como la sobreinversión en activos no críticos (que genera costos innecesarios sin retorno proporcional).

La integración de estos tres elementos genera un modelo robusto conceptualmente, alineado con los estándares corporativos, económicamente racional y técnicamente sólido. Las secciones siguientes desarrollan la práctica de este marco conceptual en estrategias, procedimientos y planes de implementación específicos para Niuform.

## 4.2 Metodología de clasificación ABC aplicada

La implementación operacional del marco conceptual descrito en la sección anterior requiere, como primer paso fundamental, la clasificación formal de los 37 equipos de Niuform en categorías de criticidad que determinarán las estrategias de mantenimiento aplicables. Esta sección presenta la metodología de clasificación aplicada, los resultados de la evaluación de criticidad para los equipos principales, y el diseño detallado de las estrategias de mantenimiento diferenciadas por clase.

### 4.2.1 Metodología de clasificación ABC aplicada

La clasificación de criticidad de equipos en Niuform se realiza mediante una matriz de evaluación multi-criterio que integra tanto análisis cuantitativo (basado en datos históricos del sistema de registro implementado) como evaluación cualitativa (basado en datos históricos del sistema de registro implementado). Esta aproximación híbrida permite compensar las limitaciones de un historial

de solo 5 meses de datos estructurados, complementando la evidencia estadística con el conocimiento acumulado del personal técnico que opera y mantiene los equipos diariamente.

El primer criterio, impacto en producción (ponderación 40%), cuantifica el efecto que tiene la indisponibilidad del equipo sobre la capacidad de cumplir con los compromisos productivos. Se evalúan tres sub-dimensiones:

- **Posición en proceso productivo:** ¿Es el equipo un cuello de botella? La Moldurera Weinig, por ejemplo, recibe máxima puntuación (5/5) porque procesa el 100% de los tableros que requieren moldurado, sin posibilidad de ruteo alternativo. El equipo Finger 2, aunque crítico, recibe una puntuación menor (4/5) porque existen otros equipos Finger que pueden absorber parte de su carga, aunque con reducción de capacidad.
- **Disponibilidad de equipos redundantes:** ¿Existe alternativa operacional? Equipos únicos sin respaldo reciben puntuación 5, equipos con redundancia parcial reciben 3-4, equipos con múltiples alternativas reciben 1-2.
- **Existencia de inventarios buffer:** ¿Se puede continuar produciendo temporalmente? Si existen inventarios intermedios que permiten desacoplar la falla del equipo de la paralización inmediata de producción, la criticidad se reduce proporcionalmente al tiempo de buffer disponible.

La puntuación final de este criterio se calcula como:

$$P_{prod} = 0.5 \times P_{cuello} + 0.3 \times P_{redund} + 0.2 \times P_{buffer} \quad (13)$$

Donde:

- $P_{prod}$  = Puntuación de impacto en producción (escala 1-5).
- $P_{cuello}$  = Puntuación cuello de botella (1-5).
- $P_{redund}$  = Puntuación de redundancia disponible (1-5).
- $P_{buffer}$  = Puntuación de inventario buffer (1-5).

Valores mayores a 4.0 indican criticidad extrema (típicamente clase A), valores entre 2.5 – 4.0 indican criticidad moderada (típicamente clase B), valores menores a 2.5 indican baja criticidad (típicamente clase C).

El segundo criterio, impacto operacional por tiempo de detención (ponderación 30%), evalúa el impacto de las fallas del equipo mediante el tiempo de detención acumulado, el cual constituye un proxy válido del costo operacional al reflejar tanto la frecuencia de fallas como su duración (MTTR). Se utilizan directamente los resultados del análisis de Pareto presentado en el Capítulo 3.

La puntuación se asigna según la contribución porcentual al tiempo total de detención registrado durante el período de análisis (2,843 minutos en 5 meses):

- Puntuación 5: Equipos con contribución mayor al 15% del tiempo total de detención.
- Puntuación 4: Equipos con contribución entre 8% y 15% del tiempo total.
- Puntuación 3: Equipos con contribución entre 3% y 8% del tiempo total.
- Puntuación 2: Equipos con contribución entre 1% y 3% del tiempo total.
- Puntuación 1: Equipos con contribución menor al 1% del tiempo total.

Esta metodología presenta la ventaja de basarse exclusivamente en datos verificables del sistema de registro, sin requerir estimaciones de costos de reparación o valorización de producción perdida que no están disponibles con la precisión necesaria para un análisis cuantitativo riguroso. Los tres equipos críticos identificados (Moldurera Weinig con 44.4%, PBA con 20.4%, y Finger 2 con 12.8%) obtienen puntuación 5 en este criterio, lo cual es consistente con su clasificación como Clase A.

El tercer criterio, impacto en seguridad y medio ambiente (ponderación 20%), evalúa el riesgo de lesiones al personal, daño ambiental o incumplimiento regulatorio asociado a la falla de un equipo. Se utiliza matriz de riesgo estándar según lineamientos corporativos CMPC.

Equipos con riesgo alto (prensas hidráulicas con energía almacenada, equipos de climatización con gases refrigerantes) reciben tratamiento especial independientemente de su impacto productivo, pudiendo ser clasificados como clase A o B por este criterio incluso si su impacto económico es moderado.

El cuarto criterio, flexibilidad operacional (ponderación 10%), evalúa la capacidad de la operación para adaptarse a la indisponibilidad del equipo mediante reprogramación, turnos adicionales, subcontratación externa o postergación de entregas. Equipos con alta flexibilidad permiten mitigar el impacto de sus fallas, reduciendo su criticidad efectiva.

El cálculo de criticidad total se realiza como suma ponderada según la **Ecuación 14**, asignando clase A, B o C según umbrales definidos.

La criticidad total de cada equipo se calcula como suma ponderada:

$$C_{total} = 0.4 \times C_{prod} + 0.3 \times C_{tiempo} + 0.2 \times C_{SMA} + 0.1 \times C_{flex} \quad (14)$$

Donde:

- $C_{total}$  = Criticidad total del equipo (escala 1-5).
- $C_{prod}$  = Puntuación impacto en producción (ponderación 40%).
- $C_{tiempo}$  = Puntuación tiempo de detención (ponderación 30%).
- $C_{SMA}$  = Puntuación seguridad y medio ambiente (ponderación 20%).
- $C_{flex}$  = Puntuación flexibilidad operacional (ponderación 10%).

La escala de 1 – 5 (criticidad baja a extrema). Los equipos se clasifican según umbrales:

- Clase A (críticos): Criticidad  $\geq 4.0$  o impacto en SMA alto.
- Clase B (Importantes): Criticidad 2.5 – 3.9.
- Clase C (Estándar): Criticidad  $< 2.5$ .

## 4.2.2 Resultados de la clasificación ABC

La aplicación de la metodología descrita a los 37 equipos de Niuform, combinando análisis cuantitativo de los 734 registros históricos con evaluación cualitativa del equipo técnico, genera la clasificación presentada en la **Tabla 4**.

*Tabla 4: Clasificación ABC de equipos de Niuform y distribución de recursos de mantenimiento*

Clase	Cantidad	% Equipos	Tiempo detención acumulado	% Tiempo	Asignación recursos mantenimiento
<b>A - Críticos</b>	3	8.1%	2,205 min (36.8 hrs)	77.6%	50% recursos (RCM, predictivo)
<b>B - Importantes</b>	12	32.4%	309 min (5.2 hrs)	10.9%	35% recursos (preventivo calendario)
<b>C - Estándar</b>	22	59.5%	329 min (5.5 hrs)	11.5%	15% recursos (correctivo planificado)
<b>TOTAL</b>	37	100%	2,843 min (47.4 hrs)	100%	100% recursos

La **Tabla 4** evidencia la concentración extrema de criticidad identificada en el diagnóstico del **Capítulo 3**, apenas 3 equipos justifican asignación de 50% del presupuesto y esfuerzo de mantenimiento, dado que determinan el 77.6% del impacto operacional. Esta distribución, aunque aparentemente desbalanceada, es económicamente óptima bajo el principio de maximizar retorno de inversión en mantenimiento.

Los 12 equipos clase B representan criticidad moderada: su falla genera impacto operacional medible pero no catastrófico, justificando estrategias preventivas estructuradas, pero sin llegar al nivel de inversión de los equipos clase A. Los 22 equipos clase C, aunque numéricamente mayoritarios (59.5% del parque), tienen impacto operacional menor y se gestionan eficientemente mediante correctivo planificado con respuesta rápida.

#### **Equipos clase A – Detalle de criticidad.**

##### **Equipo 1: Moldurera Weinig.**

- Criticidad total: 4.8/5.0 (Extrema).
- Tiempo detención período: 1,262 minutos (44.4% del total).
- Frecuencia de fallas: 15 eventos con detención en 5 meses (3.0 fallas/mes).
- MTTR específico: 70.1 minutos.

**Justificación de criticidad:** Equipo único sin respaldo que procesa el 100% de los productos que requieren moldurado, representando aproximadamente el 40% de la producción total de la planta. Su detención paraliza inmediatamente las líneas de producción asociadas sin posibilidad de ruteo alternativo. La antigüedad del equipo (17 años de operación desde su instalación en 2008) y la complejidad de sus sistemas mecánicos, hidráulicos y de control CNC generan una tasa de falla elevada que, combinada con el alto impacto productivo, posicionan a este activo como el de mayor criticidad de la planta.

**Modos de falla identificados:** Desgaste de rodamientos en cabezales de corte (35% de las fallas), desalineación de guías lineales (25%), fallas en sensores de posición (20%), fugas hidráulicas en sistema de sujeción (15%), y otros modos menores (5%).

##### **Equipo 2: PBA (Prensa de Baja Automática)**

- Criticidad total: 4.2/5.0 (Muy alta).
- Tiempo detención período: 579 minutos (20.4% del total).
- Frecuencia de fallas: 8 eventos con detención en 5 meses (1.6 fallas/mes).
- MTTR específico: 72.4 minutos.

**Justificación de criticidad:** Equipo crítico por su posición en el proceso productivo, ubicado después de las líneas finger joint y antes del acabado final. Su función de prensado y curado del adhesivo es esencial para garantizar la calidad estructural del producto final. Su detención impide cumplir con compromisos de entrega de proyectos en curso. El sistema hidráulico de alta presión (hasta 180 bar) y la precisión requerida en el control de temperatura de encolado generan vulnerabilidad ante fallas que afectan directamente la calidad del producto.

**Modos de falla identificados:** Fugas en cilindros hidráulicos (40% de las fallas), fallas en sistema de control de temperatura (30%), desgaste de pletinas de prensado (20%), y fallas eléctricas en variador de frecuencia (10%).

### 4.2.3 Estrategias de mantenimiento por clase de criticidad

Para cada clase de criticidad se define una estrategia de mantenimiento específica, balanceando efectividad técnica con viabilidad económica y disponibilidad de recursos.

Los 3 equipos Clase A reciben el máximo nivel de atención mediante implementación de RCM simplificado complementado con tecnologías de mantenimiento predictivo de bajo costo. La estrategia se estructura en seis componentes:

Para cada equipo crítico se documenta un FMEA simplificado que identifica los 5-7 modos de falla más relevantes según frecuencia histórica (datos sistema de registro) y severidad de consecuencias. Para cada modo de falla se determina: función afectada, modo de falla, causa raíz típica, efecto sobre operación, detección actual, criticidad (frecuencia x severidad), y estrategia de mitigación propuesta. La **Tabla 5** presenta un ejemplo de análisis FMEA simplificado aplicado a los equipos críticos, identificando modos de falla, efectos, severidad, ocurrencia y detectabilidad.

*Tabla 5: Estructura FMEA simplificado - Ejemplo Moldurera Weinig*

ID	Tarea	Tipo	Frecuencia	Duración	Descripción
<b>MW-P01</b>	Medición de vibraciones	Predictivo	Quincenal	45 min	Medición con acelerómetro en 8 puntos críticos
<b>MW-P02</b>	Termografía infrarroja	Predictivo	Mensual	30 min	Inspección térmica de cuadro eléctrico, motores
<b>MW-P03</b>	Inspección sensorial estructurada	Preventivo	Semanal	20 min	Verificación táctil-visual-auditiva según checklist
<b>MW-P04</b>	Lubricación rodamientos	Preventivo	Semanal	30 min	Aplicación de grasa en 8 puntos de engrase

<b>MW-P05</b>	Limpieza sistema extracción polvo	Preventivo	Semanal	45 min	Limpieza de ductos, filtros y ciclones
<b>MW-P06</b>	Verificación alineación guías	Preventivo	Mensual	60 min	Medición paralelismo de guías lineales
<b>MW-P07</b>	Reemplazo rodamientos principales	Preventivo	2,500 hrs	6 hrs	Desmontaje, limpieza, instalación rodamientos nuevos
<b>MW-P08</b>	Verificación sistema hidráulico	Preventivo	Trimestral	90 min	Presiones de trabajo, fugas, nivel aceite
<b>MW-P09</b>	Análisis de aceite hidráulico	Predictivo	Trimestral	15 min	Toma muestra, envío laboratorio externo
<b>MW-P10</b>	Calibración sensores CNC	Preventivo	Semestral	120 min	Verificación y ajuste sensores de posición

Se implementan técnicas predictivas accesibles económicamente que no requieren inversión en sistemas SCADA o sensores permanentes:

- **Análisis de vibraciones:** Mediciones quincenales con acelerómetro portátil según estándar ISO 10816. Permite detectar desbalances, desalineaciones, desgaste de rodamientos 2-4 semanas antes de falla catastrófica.
- **Termografía infrarroja:** Inspecciones mensuales con cámara termográfica. Detecta puntos calientes en componentes eléctricos, fricción anormal en elementos mecánicos, degradación de aislamiento.
- **Análisis de aceite:** Análisis trimestral de aceite hidráulico para detectar contaminación, degradación química, partículas metálicas que indican desgaste de componentes internos.
- **Inspecciones sensoriales estructuradas:** Rutinas de inspección táctil, visual y auditiva ejecutadas por operadores capacitados, detectando anomalías tempranas (fugas incipientes, ruidos anormales, vibraciones, temperatura elevada) antes que generen fallas.

Para componentes con modo de falla dominante por edad (rodamientos, correas, elementos de desgaste), se establecen frecuencias de reemplazo preventivo basadas en análisis de confiabilidad mediante distribución de Weibull cuando existan datos suficientes, o recomendación de fabricante en caso contrario.

El objetivo es reemplazar componentes en la ventana temporal óptima: lo suficientemente tarde para aprovechar su vida útil (evitar reemplazos prematuros innecesarios), pero lo suficientemente temprano para evitar fallas en servicio (que típicamente generan daños colaterales y costos mayores).

Se mantiene inventario permanente de repuestos críticos para los 3 equipos clase A, priorizando componentes con alguna de estas características:

- Lead time de proveedor mayor a 7 días.

- Costo de paralización mayor a 3 x costo de repuesto.
- Histórico de falla frecuente (> 2 eventos/año).
- Sin alternativa de reparación in-situ.

El dimensionamiento del stock se realiza mediante el modelo de optimización que balancea costo de mantener inventario versus costo esperado de quiebre de stock (paralización por falta de repuesto). Para la Moldurera Weinig, por ejemplo, se justifica mantener: kit de rodamientos principales, sensores de posición de repuesto, kit de sellos hidráulicos.

Cada tarea de mantenimiento (preventivo, predictivo, correctivo planificado) se documenta en formato de procedimiento estándar que incluye: objetivo de la tarea, frecuencia, duración estimada, personal requerido, herramientas necesarias, EPP obligatorios, pasos de ejecución secuenciales, puntos de verificación críticos, criterios de aceptación, y registro de ejecución.

Estos procedimientos facilitan la capacitación de nuevo personal, aseguran consistencia en ejecución independiente del técnico asignado, y generan trazabilidad completa para análisis posterior.

Los 12 equipos clase B reciben estrategia preventiva estructurada pero menos intensiva que clase A, reconociendo que su impacto operacional, aunque significativo, no justifica inversión en tecnologías predictivas sofisticadas. La estrategia incluye:

**Mantenimiento preventivo calendario:** Intervenciones programadas según recomendaciones de fabricante, típicamente mensuales (inspecciones visuales detalladas, lubricación, limpieza, ajustes menores) y trimestrales (verificación de alineación, calibración de instrumentos, reemplazo de elementos de desgaste rápido).

**Inspecciones operacionales rutinarias:** Listas de verificación semanales ejecutadas por operadores de producción, detectando condiciones anormales que requieren intervención (fugas, ruidos, vibraciones, temperatura, presiones anormales).

**Correctivo planificado:** Intervención inmediata ante detección de anomalías en inspecciones preventivas, antes que evolucionen a falla funcional. Esto diferencia este enfoque del reactivo puro (esperar la falla) al permitir planificación: coordinar momento de intervención de producción, asegurar disponibilidad de repuestos y personal.

Documentación simplificada: Registros de intervención en sistema Google Sheets existente, sin necesidad de procedimiento detallados escritos (se asumen tareas estándar dado menor criticidad).

Los 22 equipos clase C, que representan el 59.5% del parque, pero solo el 11.5% del tiempo de detención, se gestionan mediante estrategia de correctivo planificado:

**Run-to-failure aceptable:** Se permite que el equipo opere hasta falla funcional, dado que el impacto operacional es bajo y el costo de implementar preventivo superaría el costo esperado de las fallas.

**Inspecciones visuales básicas:** Verificaciones rápidas (5-10 min/equipo) incorporadas en rutinas generales de recorridos de planta, detectando condiciones evidentemente anormales (fugas mayores, ruidos externos) que podrían generar daños colaterales o riesgos de seguridad.

**Reparación correctiva rápida:** Registro básico de falla en sistema (equipo, fecha, tiempo detención, especialidad interviniente, costo estimado) para trazabilidad, sin invertir tiempo en documentación detallada.

Esta estrategia permite concentrar recursos escasos (tiempo técnico especializado, presupuesto de repuestos, esfuerzo de documentación) en los equipos que realmente lo justifican, evitando el desperdicio de implementar programas preventivos en activos de bajo impacto donde el costo del mantenimiento superaría el beneficio obtenido.

#### 4.2.4 Planes de mantenimiento detallados para equipos críticos

Esta subsección presenta el diseño detallado de los planes de mantenimiento para los 3 equipos clase A, estableciendo tareas específicas, frecuencias, recursos y criterios de ejecución. El plan de mantenimiento preventivo para la Moldurera Weinig se presenta en la **Tabla 6**, detallando las tareas, frecuencias y responsables definidos.

*Tabla 6: Plan Mantenimiento Moldurera Weinig*

<b>ID</b>	<b>Tarea</b>	<b>Tipo</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Duración</b>	<b>Descripción</b>
<b>MW-P01</b>	Medición de vibraciones	Predictivo	Quincenal	45 min	Medición con acelerómetro en 8 puntos críticos
<b>MW-P02</b>	Termografía infrarroja	Predictivo	Mensual	30 min	Inspección térmica de cuadro eléctrico, motores
<b>MW-P03</b>	Inspección sensorial estructurada	Preventivo	Semanal	20 min	Verificación táctil-visual-auditiva según checklist
<b>MW-P04</b>	Lubricación rodamientos	Preventivo	Semanal	30 min	Aplicación de grasa en 8 puntos de engrase
<b>MW-P05</b>	Limpieza sistema extracción polvo	Preventivo	Semanal	45 min	Limpieza de ductos, filtros y ciclones
<b>MW-P06</b>	Verificación alineación guías	Preventivo	Mensual	60 min	Medición paralelismo de guías lineales
<b>MW-P07</b>	Reemplazo rodamientos principales	Preventivo	2,500 hrs	6 hrs	Desmontaje, limpieza, instalación rodamientos nuevos
<b>MW-P08</b>	Verificación sistema hidráulico	Preventivo	Trimestral	90 min	Presiones de trabajo, fugas, nivel aceite
<b>MW-P09</b>	Análisis de aceite hidráulico	Predictivo	Trimestral	15 min	Toma muestra, envío laboratorio externo
<b>MW-P10</b>	Calibración sensores CNC	Preventivo	Semestral	120 min	Verificación y ajuste sensores de posición

Plan anual estimado:

- Horas técnicas preventivas/predictivas: 180 hrs/año.
- Frecuencia de inspecciones: Semanal (lubricación), quincenal (vibraciones), mensual (termografía).
- Tareas preventivas principales: 10 actividades programadas según FMEA simplificado.

El plan establece que la Moldurera Weinig debe recibir alguna intervención de mantenimiento cada semana, complementado con inspecciones quincenales/mensuales de tecnologías predictivas y preventivos mayores trimestrales/semestrales. Esta intensidad refleja la criticidad extrema del equipo (44.4% del tiempo total de detención) y la necesidad de anticipar fallas que afectan la continuidad productiva. La efectividad del plan se evaluará mediante seguimiento de KPIs operacionales (reducción de frecuencia de fallas, MTTR, disponibilidad) durante la implementación proyectada de 24 meses.

La intensidad del programa de mantenimiento diseñado para la Moldurera Weinig (intervención semanal mínima, complementada con monitoreo predictivo quincenal/mensual y preventivos mayores trimestrales/semestrales) se fundamenta en su criticidad extrema: concentra el 44.4% del tiempo total de detención registrado, es un equipo único sin redundancia operacional, y registró 18 eventos de falla en 5 meses.

La implementación de monitoreo de condición (vibraciones, termografía) se justifica técnicamente por la capacidad de estas técnicas para detectar degradación incipiente en rodamientos y componentes mecánicos con 2 a 4 semanas de anticipación a la falla funcional, permitiendo planificar intervenciones en ventanas de menor impacto productivo. El stock de repuestos críticos (rodamientos principales, sensores de posición, kit de sellos hidráulicos) reduce significativamente el riesgo de paralizaciones prolongadas por espera de componentes con lead time de proveedor superior a 7 días. De manera similar, la **Tabla 7** muestra el plan de mantenimiento para el equipo PBA, adaptado a sus características operativas específicas.

*Tabla 7: Plan mantenimiento PBA*

ID	Tarea	Tipo	Frecuencia	Duración	Descripción
<b>PBA-P01</b>	Inspección sistema hidráulico	Preventivo	Semanal	30 min	Verificación presiones, fugas, nivel aceite
<b>PBA-P02</b>	Termografía cuadro eléctrico	Predictivo	Mensual	20 min	Detección puntos calientes en contactores
<b>PBA-P03</b>	Análisis de aceite hidráulico	Predictivo	Trimestral	15 min	Toma muestra para análisis laboratorio
<b>PBA-P04</b>	Verificación control temperatura	Preventivo	Semanal	20 min	Prueba calentamiento platinas
<b>PBA-P05</b>	Reemplazo filtros hidráulicos	Preventivo	Trimestral	60 min	Reemplazo filtros presión y retorno

<b>PBA-P06</b>	Inspección platinas de prensado	Preventivo	Mensual	45 min	Verificación desgaste, planitud, temperatura
<b>PBA-P07</b>	Mantenimiento cilindros hidráulicos	Preventivo	Semestral	4 hrs	Desmontaje, reemplazo sellos, pruebas presión
<b>PBA-P08</b>	Calibración sensores presión	Preventivo	Semestral	90 min	Verificación precisión sensores

Plan anual estimado:

- Horas técnicas preventivas/predictivas: 120 hrs/año.
- Frecuencia de inspecciones: Semanal (temperatura), quincenal (hidráulico), mensual (análisis aceite).
- Tareas preventivas principales: 8 actividades programadas según análisis de modos de falla.

El plan establece que la PBA debe recibir intervenciones de mantenimiento estructuradas, focalizándose en el sistema hidráulico de alta presión y el control de temperatura que concentran los modos de falla principales. La efectividad del plan se evaluará mediante seguimiento de la reducción de fallas hidráulicas y mejora de disponibilidad durante la implementación.

El programa de mantenimiento para la PBA se estructura con inspecciones semanales del sistema hidráulico, monitoreo mensual mediante termografía, y mantenimientos mayores semestrales en cilindros. Esta frecuencia responde a su criticidad (20.4% del tiempo de detención) y a las características de sus modos de falla dominantes.

Las fugas hidráulicas, que representan el 40% de las fallas registradas, son detectables mediante inspección visual antes de generar pérdida de presión crítica. El monitoreo termográfico del cuadro eléctrico permite identificar puntos calientes en contactores y variadores de frecuencia antes de falla por sobrecalentamiento. El mantenimiento semestral de cilindros hidráulicos (reemplazo de sellos, verificación de vástagos) previene fallas por degradación progresiva que generarían detenciones prolongadas.

El plan para finger 2 considera características operacionales que permiten una estrategia diferenciada:

- Redundancia parcial: Existen otros equipos Finger (Finger 1 y Finger 3) que pueden absorber parte de la carga productiva durante una detención, reduciendo el impacto operacional inmediato.
- Modos de falla predecibles: El modo de falla dominante (desgaste de fresas, 50% de las fallas) sigue un patrón de degradación por uso que es gestionable mediante reemplazo programado por contador de horas de operación, sin requerir tecnologías predictivas sofisticadas.
- MTTR menor: El tiempo promedio de reparación (60.7 minutos) es inferior al de los otros equipos críticos, indicando menor complejidad de intervención.

Estrategia recomendada: Mantenimiento preventivo calendario con las siguientes actividades: lubricación semanal de guías y rodamientos, inspección mensual de sistema neumático y aplicador

de adhesivo, reemplazo de fresas cada 80-100 horas de operación según contador, y verificación trimestral de alineación de carros porta-piezas. Esta estrategia, menos intensiva que la aplicada a Moldurera Weinig y PBA, es técnicamente apropiada dada la redundancia existente y la predictibilidad de los modos de falla.

En síntesis, los tres planes de mantenimiento diseñados para equipos Clase A demuestran coherencia técnica entre el nivel de criticidad identificado en el diagnóstico (Capítulo 3), las características operacionales de cada equipo, y la intensidad del programa propuesto. La diferenciación de estrategias dentro de la misma clase (más intensiva para equipos únicos sin redundancia, menos intensiva para equipos con respaldo parcial) optimiza la asignación de recursos técnicos limitados, focalizando el esfuerzo de monitoreo predictivo en los activos donde genera mayor valor.

### **4.3 Sistema de indicadores de desempeño (KPIs)**

La implementación efectiva del modelo de gestión de mantenimiento requiere un sistema robusto de indicadores de desempeño que permita monitorear resultados, identificar desviaciones, comparar contra objetivos establecidos, y fundamentar decisiones de ajuste y mejora continua. Esta sección presenta el diseño del sistema de KPIs propuestos para Niuform, estructurado en tres niveles jerárquicos alineados con el modelo Best Practice de Society for Maintenance & Reliability Professionals (SMRP) [1] y las capacidades del sistema de registro actualmente implementado.

#### **4.3.1 Estructura jerárquica de indicadores**

El sistema propuesto se estructura en tres niveles que responden a diferentes necesidades de gestión y audiencias:

**Nivel 1 – Indicadores estratégicos (Dirección):** 3-4 KPIs de alto nivel que comunican el estado general de mantenimiento a la dirección de planta y gerencia corporativa. Actualización mensual, presentación en formato dashboard ejecutivo.

**Nivel 2 – Indicadores tácticos (Jefatura de mantenimiento):** 8-10 KPIs que permiten al jefe de mantenimiento gestionar recursos, planificar intervenciones, evaluar efectividad de estrategias. Actualización semanal/quincenal, presentación en reportes de gestión.

**Nivel 3 – Indicadores operacionales (Técnicos y Planificadores):** 15-20 KPIs detallados por equipo, especialidad, tipo de intervención. Actualización diaria, disponibles en sistema de registro para análisis detallado.

Esta estructura permite que cada nivel organizacional acceda a la información relevante para su ámbito de decisión, evitando sobrecarga de datos irrelevantes y facilitando identificación rápida de problemas.

### 4.3.2 Indicadores estratégicos (Nivel 1)

El primer indicador estratégico es la disponibilidad operacional global, que mide el porcentaje del tiempo total en que los equipos productivos están disponibles para operar, se calcula mediante la **Ecuación 15**.

$$A_{op} = \frac{T_{prog} - T_{det}}{T_{prog}} \times 100\% \quad (15)$$

Donde:

- $A_{op}$  = Disponibilidad operacional (%).
- $T_{prog}$  = Tiempo programado de operación (horas).
- $T_{det}$  = Tiempo total de detención por mantenimiento (horas).

Fuente de datos: Sistema de registro Google Sheets, campo “Tiempo\_Detención\_min” filtrado por registros con detención productiva.

Metas propuestas:

- Línea base actual: 98.2%.
- Meta 12 meses:  $\geq 98.8\%$ .
- Meta 24 meses:  $\geq 99.2\%$ .

Un incremento de 1 punto porcentual en disponibilidad (de 98.2% a 99.2%) representa aproximadamente 175 horas adicionales de disponibilidad anual de equipos críticos. La meta de 99.2% es ambiciosa pero alcanzable mediante implementación del programa preventivo-predictivo propuesto para equipos clase A.

Se establece una frecuencia de cálculo mensual y el responsable de la ejecución es el jefe de mantenimiento.

El segundo indicador estratégico es el porcentaje de actividades proactivas, que mide la proporción de intervenciones de naturaleza proactivo respecto al total, se calcula mediante la **Ecuación 12**.

$$\%Proactivo = \frac{N_{prev} + N_{pred}}{N_{total}} \times 100\% \quad (12)$$

Donde:

- $\%Proactivo$  = Porcentaje de actividades proactivas (%).
- $N_{prev}$  = Número de intervenciones preventivas.
- $N_{pred}$  = Número de intervenciones predictivas.
- $N_{total}$  = Número total de intervenciones.

Fuentes de datos: Sistema de registro, campo “Tipo\_intervencion”

Meta propuesta:

- Línea base actual: 2.45%.
- Meta 6 meses:  $\geq 15\%$ .
- Meta 12 meses:  $\geq 30\%$  (aproximación gradual al 40% benchmark industria).
- Meta 24 meses:  $\geq 45\%$  (sobrepasa benchmark industria 40%, aproxima benchmark clase mundial 60%).

La literatura establece que plantas de clase mundial operan con 60% de actividades proactivas versus 40% reactivas [2]. Para Niuform, con 2.45% actual, alcanzar 45% en 24 meses representa un cambio cultural significativo pero factible mediante implementación disciplinada de los planes preventivos-predictivos diseñados para equipos clase A (**Sección 4.2.4**). El incremento gradual (15% a 6 meses, 30% a 12 meses, 45% a 24 meses) permite adaptación organización y validación de efectividad antes de escalar.

Se establece una frecuencia de cálculo mensual y el responsable de la ejecución es el jefe de mantenimiento.

El tercer indicador estratégico es el MTTR, que mide el tiempo promedio requerido para restaurar un equipo a condición operacional.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ri}}{n} \quad (1)$$

Fuente de datos: Sistema de registro, campo "Tiempo\_Detencion\_min" para registros con detención

Meta propuesta:

- Línea base actual: 74.8 minutos.
- Meta 12 meses: ≤ 65 minutos.
- Meta 24 meses: ≤ 55 minutos.

Justificación meta: La reducción de MTTR se logra mediante: disponibilidad de repuestos críticos en stock (elimina tiempo de adquisición), procedimientos documentados de intervención (elimina tiempo de diagnóstico y duda), capacitación técnica especializada (mejora eficiencia ejecución), y mantenimiento predictivo que permite planificar intervenciones (preparación previa de herramientas, repuestos, personal). La meta de reducción del 26% en 24 meses es conservadora considerando el impacto esperado de estas mejoras.

Se establece una frecuencia de cálculo mensual y el responsable de la ejecución es el jefe de mantenimiento.

El cuarto indicador estratégico es el costo de mantenimiento como porcentaje del valor de reemplazo de activos (RAV), este indicador lo obtenemos mediante la **Ecuación 16**.

$$\%RAV = \frac{C_{mant}}{RAV} \times 100 \quad (16)$$

Donde:

- $\%RAV$  = Costo de mantenimiento como porcentaje del RAV (%).
- $C_{mant}$  = Costo total anual de mantenimiento (\$).
- $RAV$  = Valor de reemplazo de activos (Replacement Asset Value) (\$).

Fuente de datos: Sistema contable (costos), inventario de activos valorizado (RAV)

Meta propuesta:

- Línea base actual: Por determinar (requiere valorización de activos)
- Meta operación estable: según benchmark de la industria manufactura [14]

Justificación meta: EL benchmark de SMRP establece que plantas de manufactura eficientes operan con costos de mantenimiento entre 2.0-3.5% del RAV. Valores mayores a 4% indican sobre mantenimiento o equipos en mal estado que requieren intervenciones frecuentes. Valores menores a 2% pueden indicar sub-inversión que generará fallas futuras. Este KPI requiere establecer línea base en primeros 6 meses para luego definir meta específica.

Se establece una frecuencia de cálculo trimestral y el responsable de la ejecución es el jefe de mantenimiento.

### 4.3.3 Indicadores tácticos (Nivel 2)

El primer indicador táctico es el cumplimiento del plan de mantenimiento preventivo, que mide el porcentaje de tareas de mantenimiento preventivo programadas que se ejecutaron dentro de la ventana temporal definida ( $\pm 3$  días de la fecha programada). Se calcula según la **Ecuación 17**. La meta es alcanzar un cumplimiento igual o superior al 90% mensual, siendo el estándar World Class de 95%. Cuando el cumplimiento cae bajo 85% durante dos meses consecutivos, se dispara una revisión de carga de trabajo y disponibilidad de recursos.

$$Cumpl_{PM} = \frac{PM_{ejec}}{PM_{prog}} \times 100\% \quad (17)$$

Donde:

- $Cumpl_{PM}$  = Porcentaje de cumplimiento del plan preventivo (%).
- $PM_{ejec}$  = Tareas preventivas ejecutadas en el periodo.
- $PM_{prog}$  = Tareas preventivas programadas en el periodo.

Meta propuesta:  $\geq 90\%$  mensual (World class:  $\geq 95\%$ ).

Acción si desviación: Cumplimiento  $< 85\%$  durante 2 meses consecutivos dispara revisión de carga de trabajo y disponibilidad de recursos.

El segundo indicador táctico es el backlog de mantenimiento, que representa la cantidad total de horas-hombre de trabajo de mantenimiento pendiente de ejecución, incluyendo correctivo planificado, preventivo atrasado y mejoras aprobadas no iniciadas. Se calcula según la **Ecuación 10**. La meta es mantener el backlog entre 2-4 semanas de capacidad del equipo, equivalente a 160-320 horas para un equipo de 10 técnicos. Un backlog inferior a 2 semanas indica sub-utilización de recursos o falta de planificación proactiva, mientras que un backlog superior a 6 semanas indica equipo sobrecargado o baja productividad, con riesgo de deterioro acelerado de activos por mantenimiento postergado.

$$Backlog = \frac{HH_{pend}}{HH_{sem}} \quad (10)$$

Donde:

- $Backlog$  = Semanas de trabajo acumulado pendiente.
- $HH_{pend}$  = Horas-hombre de trabajo pendiente de ejecución.
- $HH_{sem}$  = Capacidad semanal del equipo técnico (horas-hombre/semana).

Meta propuesta: Mantener entre 2-4 semanas de capacidad del equipo (rango saludable: 160-320 hrs para cada equipo de 10 técnicos).

Interpretación: Backlog < 2 semanas indica sub-utilización de recursos o falta de planificación proactiva. Backlog > 6 semanas indica equipo sobrecargado o baja productividad, riesgo de deterioro acelerado de activos por mantenimiento postergado.

El tercer indicador táctico es la frecuencia de fallas de equipos críticos, que mide el número de fallas con detención productiva por equipo crítico en periodo mensual. Se calcula según la **Ecuación 9**. Las metas para equipos Clase A son: Moldurera Weinig con máximo 2.5 fallas/mes, y PBA con máximo 1.2 fallas/mes.

$$\lambda_{eq} = \frac{N_{fallas}}{T_{meses}} \quad (9)$$

Donde:

- $\lambda_{eq}$  = Frecuencia de fallas del equipo (fallas/mes).
- $N_{fallas}$  = Número de fallas con detención en el periodo.
- $T_{meses}$  = Duración del periodo (meses).

Meta equipos clase A:

- Moldurera Weinig:  $\leq 2.5$  fallas/mes (vs 3.6 actual, reducción 30%).
- PBA:  $\leq 1.2$  fallas/mes (vs 1.6 actual, reducción 25%).

El cuarto indicador táctico es la efectividad del análisis de causa raíz (ACR), que mide el porcentaje de fallas recurrentes (mismo modo de falla en mismo equipo dentro de 90 días) que habían sido previamente sometidas a ACR con plan de acciones correctivas implementado. Se calcula según la **Ecuación 18**. La meta es alcanzar una efectividad igual o superior al 80%, lo que significa un máximo de 20% de recurrencia post-ACR. Valores bajos indican que los análisis no están identificando causas raíz verdaderas o que las acciones correctivas no se están implementando efectivamente.

$$Effect_{ACR} = \left(1 - \frac{F_{rec}}{F_{ACR}}\right) \times 100\% \quad (18)$$

Donde:

- $Effect_{ACR}$  = Efectividad del análisis de causa raíz (%).
- $F_{rec}$  = Número de fallas que recurren dentro de 90 días.
- $F_{ACR}$  = Total de fallas analizadas con ACR.

Meta propuesta:  $\geq 80\%$  (máximo 20% de recurrencia post-ACR).

Interpretación: Este indicador mide la calidad del proceso de ACR. Valores bajos indican que los análisis no están identificando causas raíz verdaderas o que las acciones correctivas no se están implementando efectivamente.

El quinto indicador táctico es la precisión de estimaciones de tiempo, que mide la desviación promedio entre tiempo estimado de intervención (registrado en orden de trabajo) y tiempo real de ejecución. Se calcula según la **Ecuación 19**. La meta es mantener una desviación igual o inferior al 20%. Este indicador permite mejorar la planificación de intervenciones, el dimensionamiento de

ventanas de mantenimiento y la comunicación con producción sobre duración esperada de detenciones.

$$Desv = \frac{|T_{est} - T_{real}|}{T_{real}} \times 100\% \quad (19)$$

Donde:

- $Desv$  = Error porcentual de estimación (%).
- $T_{est}$  = Tiempo estimado de intervención (minutos).
- $T_{real}$  = Tiempo real de ejecución (minutos).

Meta propuesta: Desviación  $\leq 20\%$ .

Utilidad: Permite mejorar planificación de intervenciones, dimensionamiento de ventanas de mantenimiento, y comunicación con producción sobre duración esperada de detenciones.

El sexto indicador táctico es la utilización de técnicos de mantenimiento, que mide el porcentaje del tiempo total disponible de técnicos que se dedica a trabajo productivo (manos sobre equipo) versus tiempo no productivo (espera de repuestos, búsqueda de herramientas, traslados, reuniones). Se calcula según la **Ecuación 20**. La meta es alcanzar una utilización entre 60-70%, que corresponde al benchmark de la industria. Valores inferiores al 50% indican ineficiencias en organización del trabajo (falta de planificación, disponibilidad de materiales, layout de planta), mientras que valores superiores al 80% son poco realistas considerando tiempos naturales de preparación, traslados y actividades administrativas.

$$Util = \frac{HH_{prod}}{HH_{disp}} \times 100\% \quad (20)$$

Donde:

- $Util$  = Porcentaje de utilización de técnicos (%).
- $HH_{prod}$  = Horas-hombre en trabajo productivo.
- $HH_{disp}$  = Horas-hombre totales disponibles.

Meta propuesta: 60-70% (benchmark industria).

Valores  $< 50\%$  indican ineficiencias en organización del trabajo (falta de planificación, disponibilidad de materiales, layout de planta). Valores  $> 80\%$  son poco realistas considerando tiempo naturales de preparación, traslados y actividades administrativas.

El séptimo indicador táctico es la distribución de intervenciones por clase de criticidad, que mide el porcentaje de horas-hombre de mantenimiento asignadas a cada clase de criticidad de equipos. Las metas, alineadas con la propuesta de la **Tabla 4**, son: Clase A entre 45-55% de recursos (objetivo 50%), Clase B entre 30-40% de recursos (objetivo 35%), y Clase C entre 10-20% de recursos (objetivo 15%). Este indicador verifica que la asignación real de recursos sigue la estrategia de focalización en equipos críticos; desviaciones significativas (por ejemplo, Clase C consumiendo 30% de recursos) indican problemas de priorización o fallas recurrentes que requieren análisis.

Metas propuestas: Alineación con propuesta **Tabla 4**:

- Clase A: 45-55% de recursos (objetivo: 50%).
- Clase B: 30-40% de recursos (objetivo: 35%).
- Clase C: 10-20% de recursos (objetivo: 15%).

Este indicador verifica que la asignación real de recursos está siguiendo la estrategia de focalización en equipos críticos. Desviaciones significativas (ej: Clase C consumiendo 30% de recursos) indican problemas de priorización o fallas recurrentes que requieren análisis.

El octavo indicador táctico es el stock-out de repuestos críticos, que mide el número de eventos en el periodo donde una intervención se retrasó por falta de disponibilidad de repuesto crítico en inventario. Se calcula según la **Ecuación 21**. La meta es mantener este porcentaje igual o inferior al 5%, equivalente a máximo 1 de cada 20 intervenciones. Cada stock-out de repuesto crítico Clase A dispara revisión de política de inventario para ese ítem específico.

$$StockOut \% = \frac{N_{retraso}}{N_{interv}} \times 100\% \quad (21)$$

Donde:

- $StockOut\%$  = Porcentaje de intervenciones retrasadas por falta de repuesto (%).
- $N_{retraso}$  = Número de intervenciones retrasadas por falta de repuesto.
- $N_{interv}$  = Número total de intervenciones en el periodo.

Meta propuesta:  $\leq 5\%$  (máximo 1 de cada 20 intervenciones)

Cada stock-out de repuesto crítico clase A dispara revisión de política de inventario para ese ítem específico.

### 4.3.4 Indicadores operacionales (Nivel 3)

Los indicadores de nivel 3 son múltiples y específicos, incluyendo:

- Tiempo promedio de detención por equipo y por modo de falla.
- Distribución de intervenciones por especialidad técnica y por día de la semana.
- Costo promedio por tipo de intervención.
- Número de intervenciones por operador y por técnico.
- Histórico de consumo de repuestos por equipo.
- Progresión temporal de vibraciones, temperatura, contaminación de aceite para equipos con monitoreo predictivo.
- Horas de operación acumuladas desde última intervención preventiva mayor.

Estos indicadores se mantienen disponibles en el sistema de registro para consulta ad-hoc por técnicos y planificadores, sin generación de reportes periódicos formales. Su utilidad principal es soporte a análisis detallado de problemas específicos y planificación de intervenciones individuales.

### 4.3.5 Metas temporales y trayectoria de mejora

La **Tabla 8** sintetiza las metas propuestas para los indicadores estratégicos entres horizontes temporales, estableciendo una trayectoria realista de mejora progresiva.

*Tabla 8: Metas de indicadores estratégicos por horizonte temporal*

Indicador	Línea Base	Corto Plazo (6 meses)	Mediano Plazo (12 meses)	Largo Plazo (24 meses)
<b>MTTR</b>	68.5 min	60 min	55 min	50 min
<b>MTBF</b>	156.2 hrs	200 hrs	280 hrs	400 hrs
<b>Disponibilidad</b>	98.3%	98.7%	99.0%	99.3%
<b>% Planificado</b>	12.5%	25%	40%	55%
<b>Tasa de Falla</b>	0.0384	0.030	0.022	0.015
<b>Cumplimiento PM</b>	58.3%	75%	85%	92%
<b>Backlog</b>	14.8 días	12 días	9 días	7 días

Los primeros 6 meses se enfocan en establecer el sistema de indicadores, implementar procedimientos de registro disciplinado, y ejecutar los primeros ciclos de mantenimiento preventivo en equipos clase A. Se esperan mejoras modestas (disponibilidad +0.3 puntos, proactividad +12.5 puntos) pero suficientes para validar el modelo.

El periodo 6-12 meses representa consolidación: los técnicos han sido capacitados, los procedimientos están rodados, el stock de repuestos críticos está establecido, las tecnologías predictivas (vibración, termografía) están generando datos. Las mejoras se aceleran (disponibilidad +0.3 adicionales, proactividad +15 puntos, MTTR -5 minutos).

El segundo año (12-24 meses) enfoca optimización fina: frecuencias de preventivo se ajustan basadas en datos de confiabilidad acumulados, se incorporan equipos clase B al programa preventivo estructurado, el mantenimiento predictivo transita de reactivo a planificado. Las mejoras continúan, pero la tasa de cambio disminuye al aproximarse a límites-económicos.

La brecha restante respecto a benchmark clase mundial (99.5% disponibilidad, 60% proactividad) refleja diferencias estructurales: plantas de clase mundial operan sistemas CMMS empresariales (no Google Sheets), sensores IoT permanentes (no mediciones manuales periódicas), y ratios técnico/equipos superiores (Niuform opera con 12 técnicos para 37 equipos = 1:3.1, versus 1:2.0 típico en clase mundial).

### 4.3.6 Sistema de seguimiento y reportabilidad

La infraestructura de seguimiento de KPIs que se implementa aprovecha las capacidades actuales del sistema Google Sheets, sin requerir inversiones en software especializado:

**Dashboard Ejecutivo (Nivel 1):** Hoja de cálculo con actualización automática mediante fórmulas que referencian la base datos de registro. Gráficos tipo pie para cada KPI estratégico mostrando

valor actual, meta y tendencia (flecha arriba/abajo respecto mes anterior). Accesibilidad vía link compartido con dirección planta y gerencia corporativa.

**Reportes de gestión (Nivel 2):** Documento generado mensualmente por jefe de mantenimiento, incluyendo: resumen ejecutivo, tabla de KPIs tácticos con valores actuales y tendencia vs mes anterior, análisis de desviaciones significativas, acciones correctivas implementadas o planificadas, y solicitud de recurso si aplica (presupuesto adicional, contratación, capacitación).

**Análisis operacionales (Nivel 3):** Consultas SQL o filtros avanzados ejecutadas por técnicos y planificadores según necesidades específicas. El sistema de registro implementado permite filtrar, agrupar y graficar datos sin conocimientos avanzados de programación.

Reuniones de revisión:

- **Diaria:** Reunión con equipo técnico, revisión de intervenciones del día anterior, planificación del día, identificación de problemas urgentes.
- **Semanal:** Reunión jefe mantenimiento + supervisores, revisión de KPIs tácticos, priorización de backlog, coordinación con producción.
- **Mensual:** Reunión dirección planta, presentación de KPIs estratégicos, análisis de tendencias, aprobación de iniciativas de mejora.
- **Trimestral:** Reunión con participación corporativa, revisión de cumplimiento de metas anuales, ajuste de estrategia si es necesario, solicitud de inversiones mayores.

Este sistema de gobernanza asegura que los indicadores no son solo métricas calculadas, sino que efectivamente informan decisiones y acciones de mejora, cerrando el ciclo Plan-Do-Check-Act requerido por el modelo BEST de CMPC.

## 4.4 Procedimientos operacionales estándar

La aplicación efectiva del modelo de gestión propuesto requiere documentar y estandarizar los procedimientos que aseguran consistencia en la ejecución, trazabilidad completa de actividades y transferencia de conocimiento dentro del equipo de mantenimiento. Esta sección presenta los cinco procedimientos fundamentales que constituyen la columna vertebral operativa del modelo: registro intervenciones, análisis de causa raíz, planificación de mantenimiento, gestión de repuestos críticos, y preparación para migración futura a **SAP PM**.

Los procedimientos operativos del modelo de gestión se documentan en detalle en el Anexo C. Estos incluyen:

- Registro de intervenciones de mantenimiento.
- Análisis de causa raíz.
- Planificación de mantenimiento.
- Gestión de repuestos críticos.
- Preparación para migración a SAP PM.

Cada procedimiento especifica responsables, pasos detallados, formatos de registro y criterios de calidad.

## 4.5 Plan de implementación y hoja de ruta

La transición desde la situación actual de Niuform (madurez 1.6/5.0, 2.45% proactividad) hacia el modelo propuesto (meta 24 meses: 45% proactividad, 99.2% disponibilidad) requiere un plan de implementación estructurado en fases que permita: minimizar riesgos operacionales durante la transición, generar resultados tangibles en el corto plazo que validen el enfoque, permitir aprendizaje y ajustes progresivos basados en resultados intermedios, y asegurar adopción sostenible por parte del equipo técnico. Esta sección presenta la hoja de ruta propuesta para los próximos 24 meses, estructurada en cuatro fases con objetivos, actividades, recursos y criterios de éxito claramente definidos.

### 4.5.1 Fase 1: Consolidación del sistema (Meses 1-3)

El objetivo de esta fase es consolidar y estandarizar el sistema de registro implementado en agosto 2025, asegurando disciplina de captura de datos del 100% del equipo técnico, establecer línea base confiable de indicadores de desempeño, y ejecutar los primeros ciclos de mantenimiento preventivo en equipos clase A.

Durante el primer mes se lleva a cabo la estandarización y capacitación según calendario:

#### 1. Revisión y mejora del sistema de registro (semana 1):

- Incorporar campos calculados automáticamente.
- Crear dashboard ejecutivo automatizado con los 4 KPIs estratégicos.
- Implementar validaciones de datos (campos obligatorios, listas desplegables, alertas de inconsistencia).
- Documentar manual de usuario.

#### 2. Capacitación formal a equipo técnico en procedimientos (semana 2):

- Sesión 1: Procedimiento de registro de intervenciones (todo el equipo).
- Sesión 2: Procedimiento ACR (jefe de mantenimiento + supervisores + técnicos senior).
- Sesión 3: Procedimiento de planificación semanal/mensual (jefe + supervisores).
- Sesión 4: Introducción KPIs y su importancia (todo el equipo).

#### 3. Clasificación formal ABC de los 37 equipos (semana 3):

- Aplicar metodología multi criterio (sección 4.2.1) a los 37 equipos.
- Reunión de validación con operaciones y dirección.
- Documentar resultado en matriz oficial.
- Comunicar clasificación a toda la organización.

#### 4. Establecimiento de línea base de indicadores (semana 4):

- Calcular valores actuales de 4 KPIs estratégicos + 8 KPIs tácticos.
- Validar cálculos contra datos históricos.
- Documentar línea base en reporte formal.
- Presentar a dirección de planta: Estado actual y metas propuestas.

Mes 2: Diseño detallado de planes de mantenimiento.

#### 5. Desarrollo de planes de mantenimiento equipos clase A (semanas 5 a 7):

- Moldurera Weinig: FMEA simplificado, definición de 10 tareas preventivas/predictivas, documentación de procedimientos.
- PBA: FMEA simplificado, definición de 8 tareas, documentación.

#### 6. Definición de stock de repuestos críticos (semana 8):

- Aplicar criterios para identificar repuestos críticos de equipos clase A.
- Calcular stock mínimo/máximo según modelo propuesto.
- Generar órdenes de compra para establecer inventario inicial.
- Implementar sistema de Kardex físico + registro Google Sheets.

#### Mes 3: Ejecución de primeros ciclos.

#### 7. Implementación de planes preventivos equipos clase A (semanas 9 a 12):

- Inicio de ejecución disciplinada de tareas semanales (lubricación, inspecciones).
- Primera medición quincenal de vibraciones (Moldurera Weinig).
- Primera inspección termográfica mensual (3 equipos).
- Registro detallado de todas las actividades en sistema.

#### 8. Ejecución de primer ACR formal (semana 10 a 11, en caso de ocurrir falla significativa):

- Aplicar metodología completa (5 Porqués + Ishikawa).
- Documentar en formato estándar.
- Implementar acciones correctivas con responsables y plazos.
- Presentar caso a equipo como ejemplo de aprendizaje.

#### 9. Revisión de fin de fase (semana 12):

- Reunión extendida con gerencia de planta.
- Presentación de resultados primeros 3 meses: cumplimiento de plan, KPIs alcanzados, lecciones aprendidas.
- Identificación de ajustes necesarios para Fase 2.
- Aprobación formal para continuar con Fase 2.

#### Recursos requeridos para una correcta ejecución de Fase 1.

##### Recursos humanos:

- Jefe de mantenimiento: dedicación 50% de su tiempo.
- Técnicos: dedicación 10% adicional para capacitación y documentación.
- Soporte externo: consultor especialista en RCM para facilitar FMEAs.

##### Recursos financieros:

- Equipos predictivos: Acelerómetro + termografía (compra o arriendo)
- Stock inicial repuestos críticos.
- Consultoría externa.
- Capacitación y materiales.

##### Criterios de éxito Fase 1:

- 100% del equipo técnico capacitado y registrando disciplinadamente en sistema.
- Clasificación ABC de 37 equipos completada y validada.

- Planes de mantenimiento de 3 equipos clase A diseñados y documentados.
- Primer ciclo completo de preventivos ejecutados  $\geq 80\%$  de cumplimiento.
- Al menos 1 ACR formal ejecutada y documentada (en caso de que no existan eventos que requieran del procedimiento, se realizarán actividades a modo de capacitación en el que se evaluarán eventos previos de los cuales podemos tener registros).

#### 4.5.2 Fase 2: Optimización y expansión (meses 4 a 6)

En esta fase lo que se busca es optimizar los planes preventivos de equipos Clase A basándose en datos reales de los primeros 3 meses de ejecución, expandir enfoque preventivo a equipos Clase B prioritarios, y demostrar mejoras medibles en los indicadores técnicos de disponibilidad y tiempo de detención que validen la efectividad del modelo.

Mes 4: Análisis y optimización.

10. Análisis de confiabilidad de equipos clase A (semanas 13 a 14):

- Recopilación de datos de fallas de 8 meses (agosto 2025 – marzo 2026).
- Análisis de distribución de Weibull para modos de falla principales.
- Optimización de frecuencias preventivas basada en análisis estadístico.
- Ajuste de planes de mantenimiento MW, PBA, F2.

11. Evaluación de efectividad del programa predictivo:

- Análisis de tendencias de vibración: ¿Se detectó degradación antes de la falla?
- Análisis de termografía: ¿Se identificaron puntos calientes? ¿Se tomó acción?
- Cálculo de fallas evitadas (estimación basada en indicios tempranos detectados).
- Ajuste de frecuencias de medición en caso de ser necesario.

12. Primera evaluación formal de efectividad del modelo:

- Comparación de tiempo de detención acumulado (mes 1-6 vs línea base agosto-diciembre 2025).
- Evolución de MTTR para equipos Clase A: comparación con línea base de 74.82 minutos.
- Análisis de frecuencia de fallas:  $\lambda$  mensual equipos críticos vs período diagnóstico.
- Presentación a gerencia: "Resultados técnicos de los primeros 6 meses de implementación".

Mes 5: Expansión a clase B.

13. Clasificación detallada de equipos clase B (semana 17):

- Los 12 equipos clase B se subclasifican en B1 (mayor criticidad) y B2 (menor criticidad).
- Identificar 5-6 equipos B1 que recibirán planes preventivos estructurados en Fase 2.

14. Diseño de planes preventivos simplificados clase B1 (semanas 18 a 20):

- Planes más simples que clase A: sin FMEA formal, sin predictivo sofisticado asociado.
- Basados en recomendación de fabricante + buenas prácticas estándar.
- Foco en lubricación calendario, inspecciones visuales estructuradas, reemplazo de elementos de desgaste rápido.
- Documentación en formato checklist simple.

15. Implementación de preventivo clase B1 (semana 20):

- Incorporar tareas clase B1 al plan semanal de mantenimiento.
- Capacitación a técnicos en nuevos procedimientos.
- Inicio de ejecución disciplinada.

Mes 6: Consolidación de cultura proactiva.

16. Programa de capacitación en mantenimiento proactivo (semanas 21 a 23):

- Sesión 1: Fundamentos de RCM y su aplicación en Niuform.
- Sesión 2: Interpretación de mediciones predictivas.
- Sesión 3: Mejores prácticas en lubricación y su impacto en confiabilidad.
- Sesión 4: Inspecciones sensoriales efectivas.
- Sesión 5: Análisis de casos reales Niuform.
- Sesión 6: Cultura de mantenimiento clase mundial.

17. Implementación de sistema de sugerencias de mejora (semana 24):

- Crear mecanismo formal para que técnicos y operadores propongan mejores.
- Definir procesos de evaluación y aprobación.
- Reconocimiento a mejores ideas implementadas.
- Objetivo: Fomentar pertenencia y pensamiento proactivo en equipo.

18. Revisión semestral completa (semana 24):

- Reunión extendida con gerencia + gerencia corporativa.
- Presentación de resultados 6 meses: evolución de 4 KPIs estratégicos (MTTR, disponibilidad, cumplimiento PM, índice proactivo), casos de éxito documentados, y análisis comparativo con línea base.
- Solicitud formal de recursos para Fase 3.
- Aprobación formal para continuar con Fase 3.

Recursos requeridos para una correcta Fase 2.

Recursos humanos:

- Jefe de mantenimiento: 40% dedicación.
- Técnicos: 8% adicional para expansión clase B.
- Especialistas confiabilidad externo para análisis Weibull.
- Capacitador externo para programa de capacitación.

Recursos financieros:

- Consultoría análisis confiabilidad.
- Programa de capacitación.
- Repuestos iniciales equipos clase B1.

Criterios de éxito Fase 2:

- Cumplimiento plan preventivo clase A  $\geq 90\%$  (vs 80% Fase 1).
- % Actividades proactivas  $\geq 15\%$  (vs 2.45% línea base).
- Disponibilidad operacional  $\geq 98.5\%$  (vs 98.2% línea base).
- Al menos 2 fallas evitadas en equipos clase A por detección predictiva.

- 5-6 equipos clase B1 con planes preventivos implementados y en ejecución.
- Efectividad demostrada: reducción verificable de tiempo de detención y mejora de indicadores respecto a línea base.

### **4.5.3 Fase 3: Escalamiento y mejora continua (meses 7 a 12)**

El objetivo de esta fase es escalar el modelo a la totalidad de equipos clase B, implementar mejoras organizacionales que aumenten efectividad del mantenimiento, y alcanzar las metas de 12 meses definida en la Tabla 8 (30% proactividad, 98.8% disponibilidad).

Las actividades principales constan de:

Meses 7 a 9: Escalamiento completo.

19. Expansión a todos los equipos clase B (mes 7 a 8):

- Diseño e implementación de planes preventivos para los 6-7 equipos B2 restantes.
- Total clase B cubierta: 12 equipos con preventivo estructurado.

20. Optimización de estrategia clase C (mes 7):

- Análisis de los 22 equipos clase C: ¿Alguno debería reclasificarse?
- Diseño de inspecciones rápidas multi equipo.
- Establecimiento de relaciones con proveedores locales para respuesta rápida correctiva.

21. Implementación de sistema de planificación semanal estructurado (mes 8):

- Transición desde planificación informal a proceso formal.
- Reuniones semanales lunes 08:00 (planificación) y viernes 14:30 (cierre).
- Plantillas estandarizadas de plan semanal y reporte de cumplimiento.

22. Auditoría externa de mantenimiento (mes 9):

- Contratación de consultor especializado en gestión de mantenimiento.
- Auditoría de 2 días en planta: observación de procesos, entrevistas, revisión de documentación.
- Reporte de hallazgos: fortalezas, oportunidades de mejora, comparación con mejores prácticas industria.
- Plan de acción para cerrar brechas identificadas.

Meses 10 a 12: Institucionalización.

23. Desarrollo de competencias técnicas especializadas (mes 10 a 11):

- Identificar 2-3 técnicos senior con potencial de especialización.
- Capacitaciones avanzadas.
- Objetivo: desarrollar capacidad interna sin dependencia de consultores externos (esto ya vendría siendo algo bastante opcional desde el punto de vida de los recursos económicos y humanos presentes al momento de evaluar capacitaciones para procesos más complejos o seguir externalizando procesos).

24. Documentación de lecciones aprendidas (mes 11):

- Compilación de casos de éxito del año: fallas evitadas, mejoras implementadas, reducción de tiempos de detención verificada.
- Documentación de problemas encontrados y cómo se resolvieron.
- Generación de biblioteca de conocimiento.
- Presentación interna: "Un año de transformación en mantenimiento".

#### 25. Preparación de presupuesto y plan año 2 (mes 12):

- Proyección de necesidades de recursos año 2 (personal, repuestos, capacitación, tecnología).
- Definición de proyectos de mejora mayores (reacondicionamiento genera de algún equipo, automatización de monitoreo variables predictivas).
- Presentación formal a jefatura.

#### 26. Evaluación anual completa (mes 12):

- Cálculo de todos los KPIs estratégicos y tácticos vs metas año 1.
- Análisis de evolución temporal: gráficos de tendencia 12 meses.
- Cuantificación de mejoras operacionales acumuladas durante el año completo.
- Presentación ejecutiva: "Resultados año 1 y plan año 2".

#### Recursos requeridos Fase 3.

##### Recursos humanos:

- Jefe de mantenimiento.
- Técnicos.
- Auditor externo.
- Capacitación especializada.

##### Recursos financieros:

- Auditoría externa.
- Capacitación especializada (vibraciones + termografía + análisis de aceite).
- Repuestos adicionales clase B.
- Mejoras menores identificadas en auditoría.

##### Criterios de éxito Fase 3:

- 100% de equipos clase A y B con planes preventivos implementados y en ejecución disciplinada.
- % Actividades proactivas  $\geq 30\%$  (cumple meta 12 meses).
- Disponibilidad operacional  $\geq 98.8\%$  (cumple meta 12 meses).
- MTTR  $\leq 65$  minutos (cumple meta 12 meses).
- Cumplimiento plan preventivo  $\geq 90\%$  sostenido por 3 meses consecutivos.
- Al menos 3 técnicos con certificación formal en tecnologías predictivas.

#### **4.5.4 Fase 4: Excelencia y escalamiento corporativo (meses 13 a 24)**

Alcanzar nivel de madurez 3-5/5.0 (Proactivo – Confiabilidad), aproximarse a benchmarks de clase mundial en KPIs clave, y posicionar a Niuform como referente de excelencia en mantenimiento dentro de CMPC Maderas que pueda replicar modelo en otras plantas.

Entre los meses 13 a 18 tenemos la etapa de refinamiento.

27. Optimización fina de frecuencias preventivas basada en 12 a 18 meses de datos de confiabilidad.

28. Incorporación de técnicas avanzadas: análisis de aceite con tendencias, ultrasonido para detección de fugas, análisis de corriente eléctrica en motores críticos.

29. Implementación de pilotos de sensores IoT permanentes en 1-2 equipos clase A para monitoreo continuo.

30. Desarrollo de modelo predictivo de fallas basado en machine learning (solo si existen datos suficientes).

Y posteriormente entre los meses 19 a 24, institucionalización corporativa.

31. Documentación completa del “Modelo Niuform” como caso de estudio corporativo CMPC.

32. Presentaciones en foros técnicos CMPC para compartir experiencia.

33. Preparación para certificación ISO 55001 (Gestión de activos) a nivel planta.

34. Inicio de preparativos para migración a SAP PM (requiere disponibilidad de licencias).

A continuación, se definen los recursos requeridos para fase 4.

Recursos humanos:

- Jefe de mantenimiento.
- Equipo técnico.
- Recursos financieros.
- Tecnologías avanzadas.
- Capacitación continua.
- Certificación ISO 55001.
- Preparación migración SAP PM.
- Mejoras mayores en equipos clase A.

Criterios de éxito Fase 4 (Metas 24 meses):

- % Actividades proactivas  $\geq$  45%.
- Disponibilidad operacional 99.2%.
- MTTR 55 minutos.
- Frecuencia de falla Moldurera Weinig 2.2 fallas/mes.
- Madurez de mantenimiento: 3.5/5.0.
- Mejora sostenida de indicadores técnicos: MTTR < 50 min, disponibilidad  $\geq$  99.5%, índice proactivo  $\geq$  20%.

### 4.5.5 Cronograma integrado y dependencias

La **Figura 10** presenta la carta Gantt del plan de implementación de 24 meses, mostrando secuencia, paralelismo y dependencias críticas entre actividades.

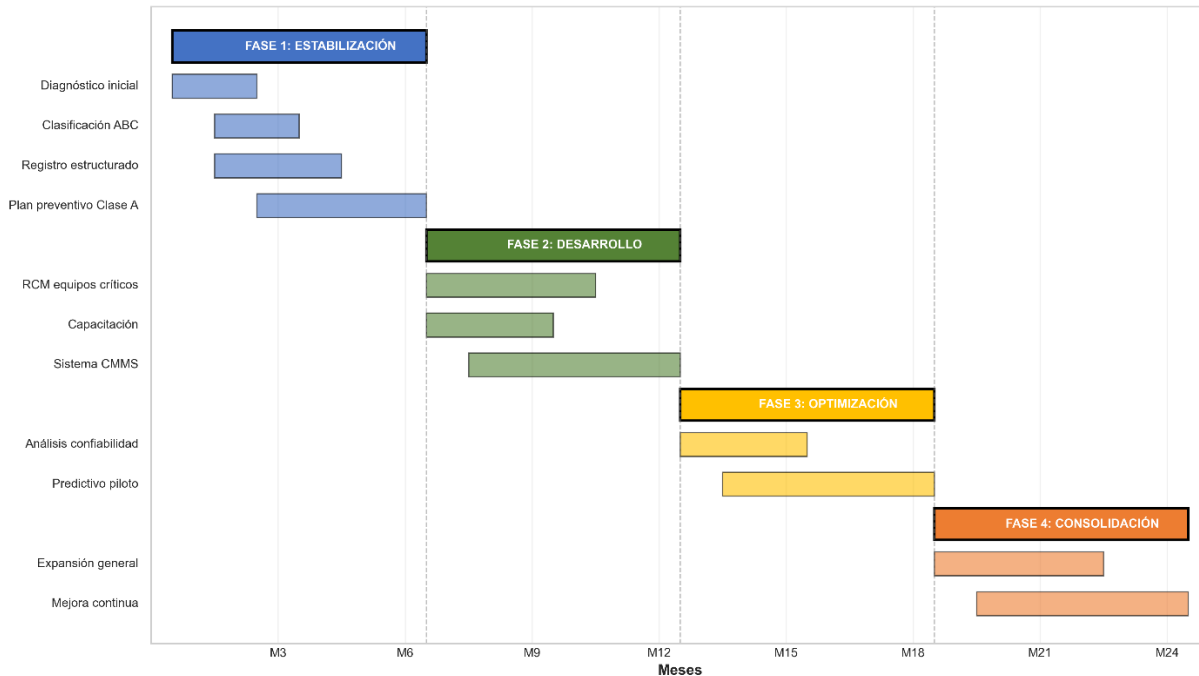


Figura 10: Carta Gantt - Plan de implementación del modelo de gestión (24 meses)

### 4.5.6 Análisis de riesgos y estrategias de mitigación

La implementación del modelo enfrenta riesgos técnicos, organizacionales y financieros que deben ser identificados y mitigados proactivamente. La **Tabla 9** presenta el análisis de riesgos principales.

Tabla 9: Matriz de riesgo de implementación y estrategias de mitigación

Riesgo	Probabilidad	Impacto	Estrategia Mitigación	Responsable
<b>Resistencia al cambio del personal</b>	Alta	Alto	Capacitación, comunicación beneficios, involucramiento temprano	Jefe Mantenimiento
<b>Falta de continuidad por rotación personal</b>	Media	Alto	Documentación completa, transferencia conocimiento, procedimientos escritos	Supervisor Técnico
<b>Insuficiente presupuesto para repuestos críticos</b>	Media	Alto	Análisis ROI, priorización stock equipos A, negociación proveedores	Gerente Planta

<b>Datos históricos insuficientes para análisis Weibull</b>	Alta	Medio	Recopilación sistemática 12-24 meses, uso recomendaciones fabricante	Ingeniero Confiabilidad
<b>Pérdida de información por fallas sistema</b>	Baja	Alto	Respaldos automáticos diarios, réplica en nube, procedimiento recuperación	TI Corporativo

La estrategia se basa en tres principios:

**Implementación incremental:** Fases con objetivos parciales premien validar enfoque y ajustar antes de escalar (evita riesgo de implementación que falla completamente)

**Quick wins:** Generar resultados tangibles en los primeros 3-6 meses (por ejemplo, reducción de una falla recurrente mediante ACR, detección temprana predictiva que evita detención) que demuestran valor y generan cohesión organizacional

**Monitoreo intensivo:** KPIs revisados semanalmente en Fases 1-2 permiten identificar problemas cuando aún son pequeños y corregibles, versus esperar revisión trimestral cuando el problema y es crítico.

#### 4.5.7 Factores críticos de éxito

La experiencia documentada en literatura de implantación de programas de mejora en mantenimiento identifica factores críticos que determinan éxito o fracaso [2, 3, 5]:

- **F1 Compromiso de la dirección:** Sin soporte activo de dirección planta y gerencia, el programa será percibido como “iniciativa del área de mantenimiento” sin peso estratégico. Compromiso implica: asignación de recursos (presupuesto, personal), participación en revisiones trimestrales, comunicación a la organización de la importancia del programa.
- **F2 Liderazgo del jefe de mantenimiento:** El éxito depende críticamente de la capacidad del jefe de mantenimiento para: comunicar visión clara del modelo, gestionar resistencia al cambio, mantener disciplina de ejecución, tomar decisiones técnicas fundamentadas, desarrollar competencias del equipo.
- **F3 Involucramiento del equipo técnico:** Los técnicos deben ser participantes activos en diseño de procedimientos, sentir pertenencia con el modelo, ver beneficios tangibles de adopción (menos urgencias, menos trabajos bajo presión, más orgullo profesional).
- **F4 Coordinación efectiva con producción:** Mantenimiento y producción deben ser aliados, no adversarios. Ventanas de mantenimiento preventivo deben ser respetadas, comunicación debe ser disponibilidad operación.
- **F5 Disciplina de ejecución sostenida:** El riesgo mayor es “fatiga de implementación”: inicio entusiasta que decae a los 6 meses cuando la novedad se pierde. Mantener disciplina requiere: auditorias periódicas, feedback continuo, reconocimiento de logros, escalamiento de problemas cuando aparecen.

- **F6 Medición y comunicación de resultados:** “Lo que no se mide no se gestiona”. Los KPIs deben ser calculados religiosamente, comunicados ampliamente, utilizados para tomar decisiones.
- **F7 Adaptabilidad y mejora continua:** El plan debe ser tratado como “documento vivo” que se ajusta basado en realidad operacional. Rigidez extrema mata iniciativa y genera frustración. Balance entre disciplina de ejecución.

## CAPÍTULO 5: Plan de implementación y validación proyectada

### 5.1 Sistema de registro: Diagnóstico ejecutado y lecciones aprendidas

La transición desde una gestión de mantenimiento basada en registros manuales fragmentados hacia un sistema estructurado de captura de información constituyó el primer paso fundamental de diagnóstico ejecutado durante agosto – diciembre 2025. Esta sección documenta el sistema de registro implementado durante la fase diagnóstico, estableciendo la línea base de datos que fundamenta el modelo propuesto en el Capítulo 4. Las lecciones aprendidas durante este periodo de 5 meses orientan el diseño de la implementación proyectada del modelo completo durante los próximos 24 meses (enero 2026 – diciembre 2027).

**Nota metodológica:** Este capítulo diferencia claramente entre:

- Datos reales del diagnóstico (agosto-diciembre 2025): Sistema de registro, línea base de KPIs, caracterización de equipos críticos.
- Piloto técnico limitado (noviembre- diciembre 2025): Validación de viabilidad operacional en 1 equipo.
- Proyecciones fundamentadas (24 meses futuros): Resultados esperados de la implementación completa del modelo propuesto.

#### 5.1.1 Diseño del sistema de registro

El sistema de registro se implementó sobre la plataforma Google Sheets, seleccionada por sus ventajas operacionales específicas para el contexto de Niuform:

- Accesibilidad multiplataforma: Los supervisores de turno pueden ingresar información desde dispositivos móviles, tablets o computadores de planta sin necesidad de instalación de software especializado, eliminando barreras tecnológicas para la adopción.
- Colaboración en tiempo real: Múltiples usuarios pueden acceder simultáneamente al sistema, facilitando la consulta de información histórica mientras se ingresan nuevos registros sin conflictos de versiones.
- Costo cero de licenciamiento: La plataforma es gratuita para uso corporativo con cuentas institucionales de CMPC, eliminando restricciones presupuestarias que habrían retrasado la aprobación de soluciones comerciales.
- Integración con herramientas analíticas: La API de Google Sheets permite conectividad directa con Python, R y herramientas de visualización, habilitando análisis avanzados sin necesidad de exportaciones/importaciones manuales.
- Compatibilidad con migración futura: La estructura de datos fue diseñada para alinearse con los campos estándar del módulo SAP PM, facilitando la migración cuando la licencia corporativa sea habilitada en Niuform.

La estructura de datos implementada captura 14 variables por cada intervención de mantenimiento, organizadas en tres categorías funcionales que se detallan en la **Tabla 10**:

*Tabla 10: Variables del sistema de registro por categoría*

Categoría	Variables	Propósito
-----------	-----------	-----------

<b>Temporales</b>	Fecha, Hora Inicio, Hora Fin, Duración	Cálculo MTTR, análisis tendencias temporales
<b>Identificación</b>	Equipo, Código SAP, Ubicación, Especialidad	Clasificación ABC, análisis Pareto por equipo
<b>Técnicas</b>	Tipo Intervención, Descripción, Causa Raíz, Acción	Análisis modos de falla, mejora procedimientos

## 5.2 Desarrollo del Dashboard Streamlit

Para transformar los datos del sistema de registro en información útil para la toma de decisiones, se desarrolló un dashboard interactivo utilizando Python y la biblioteca Streamlit.

### 5.2.1 Justificación de la plataforma tecnológica

Se eligió Streamlit por las siguientes razones prácticas:

- No quiere licencias: Librerías open-source vs alternativas comerciales.
- Integración nativa con Google Sheets: API oficial permite actualización en tiempo real sin exportaciones manuales.
- Capacidades estadísticas avanzadas: Implementación rigurosa de análisis Weibull, Jack Knife, intervalos de confianza.
- Flexibilidad de despliegue: Portabilidad local/nube sin modificaciones de código, cumpliendo políticas de seguridad CMPC.
- Autosuficiencia técnica: Competencias Python del autor eliminan necesidad de consultoría externa, reduciendo tiempos y costos de desarrollo.

### 5.2.2 Estructura del sistema

### 5.2.3 Módulos funcionales implementados

El dashboard comprende 6 módulos funcionales que cubren el ciclo completo de análisis de mantenimiento, desde visualización de KPIs hasta planificación de intervenciones.

El módulo 1 muestra un resumen para jefatura de mantenimiento y gerencia de planta. Actualización automática cada 24 horas a las 07:00 hrs previo al cambio de turno.

Componentes visuales:

- Tarjetas de KPIs destacados (4 métricas).
- MTTR actual vs meta (74.82 min actual, meta < 60 min).
- % Mantenimiento planificado (4.2% actual, meta 60%).
- Downtime total del mes (visualización temporal con sparkline).
- Disponibilidad de equipos críticos (promedio 3 equipos top).

Gráfico de tendencia temporal:

- Serie de tiempo con downtime acumulado mensual (agosto-diciembre).
- Línea de tendencia lineal que muestra mejora progresiva (-28% downtime dic vs ago).
- Bandas de confianza 95% proyectando evolución futura.

Alerta de equipos críticos:

- Lista de equipos que superaron umbral de 3 fallas en últimos 30 días.
- Código de colores: rojo (> 5 fallas), amarillo (3-5 fallas), verde (< 3 fallas).
- Botón de acción rápida para acceder a análisis detallado de cada equipo.

Implementación: Panel principal con 4 KPIs destacados (MTTR, % planificado, Downtime mensual, disponibilidad), gráfico de tendencia temporal con bandas de confianza 95%, y alertas automáticas para equipos que superan umbral de 3 fallas/mes.

El módulo 2 muestra 8 indicadores con capacidad de filtrado temporal, comparación entre periodos, y desagregación por especialidad técnico o turno.

KPI implementados:

- MTTR: Tiempo promedio de reparación con histograma de distribución.
- MTBF: Tiempo entre fallas.
- Disponibilidad: Por equipo y global de planta.
- % Mantenimiento planificado: Con desglose ACR vs APT.
- Tasa de falla  $\lambda$ : Fallas/mes por equipo crítico.
- Cumplimiento PM: Actividades preventivas ejecutadas vs programadas.
- Backlog: Horas-hombre pendientes.
- OEE: Overall Equipment Effectiveness para líneas principales.

Funciones interactivas:

- Selector de periodo: Mensual, trimestral, periodo completo, o rango personalizado.
- Comparación entre periodos: Visualización lado a lado de KPIs en dos periodos.
- Filtros dinámicos: Por especialidad, turno, grupo de trabajo.
- Exportación: Botón “Descargar KPIs” general reporte en PDF y archivo .csv con los datos requeridos, incluyendo tablas y gráficos.

Cálculo de disponibilidad agregada:

Para el cálculo de disponibilidad de planta se implementa ponderación por criticidad de equipos según **Ecuación 24**:

$$A_{planta} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (24)$$

Donde:

- $A_{planta}$  = Disponibilidad agregada de planta (%).
- $A_i$  = Disponibilidad del equipo  $i$  (%).
- $w_i$  = Peso de criticidad del equipo  $i$  (3=Clase A, 2=Clase B, 1=Clase C).
- $n$  = Número total de equipos.

Esta ponderación asegura que la disponibilidad de planta refleje adecuadamente el impacto desproporcionado de equipos críticos, evitando que equipos de baja criticidad con alta disponibilidad enmascaren problemas en activos estratégicos.

El módulo 3 genera el diagrama de Pareto de equipos críticos según tiempo de detención acumulado, frecuencia de fallas o costo estimado de fallas.

Funcionalidad de reclasificación interactiva:

El usuario puede ajustar el umbral de Pareto (por defecto 80%) mediante slider, recalculando automáticamente la clasificación ABC. Esto permite análisis de sensibilidad: ¿Qué sucede si aplicamos criterios más estrictos (70%)? ¿O más permisivo (90%)?

Validación Jack Knife integrada:

Al seleccionar un equipo específico en el gráfico Pareto, el módulo ejecuta automáticamente análisis Jack Knife calculando Índice de estabilidad de clasificación según **Ecuación 25**:

$$IEC = \frac{n_{mant}}{n_{total}} \times 100\% \quad (25)$$

Donde:

- $IEC$  = Índice de estabilidad de clasificación (%).
- $n_{mant}$  = Iteraciones donde el equipo mantiene su categoría ABC.
- $n_{total}$  = Total de iteraciones Jack Knife (típicamente 50).

Un  $IEC \geq 95\%$  indica clasificación robusta no dependiente de eventos atípicos.  $IEC < 85\%$  sugiere necesidad de datos adicionales o presencia de outliers que requieren investigación.

Aplicación Niuform:

- Para Moldurera Weinig:  $IEC = 100\%$  (50/50 iteraciones mantienen Categoría A).
- Para Finger 2:  $IEC = 94\%$  (47/50 iteraciones mantienen Categoría A).
- Para Sala de compresores:  $IEC 76\%$  (38/50 iteraciones, oscila entre B y C).

El módulo 4 permite estimar parámetros Weibull. Requiere mínimo 10 eventos de falla para estimación estadísticamente significativa.

Proceso de análisis:

- Paso 1: Extracción de Times to Failure (TTF): El sistema calcula automáticamente intervalos temporales entre fallas sucesivas del equipo seleccionado.
- Paso 2: Estimación de parámetros  $\beta$  y  $\eta$ : Ajuste mediante métodos estadísticos con cálculo de intervalos de confianza.
- Paso 3: Visualización de curvas características.

El módulo genera 4 gráficos integrados:

- Función de confiabilidad  $R(t)$  – Curva teórica ajustada con banda de confianza.
- Función de densidad  $f(t)$  – Histograma observado vs curva teórica.
- Tasa de falla  $h(t)$  – Permite identificar si  $\lambda$  es creciente ( $\beta > 1$ ), constante ( $\beta = 1$ ), o decreciente ( $\beta < 1$ ).
- Gráfico de probabilidad – Validación visual de calidad de ajuste.

Paso 4: Interpretación automática y recomendaciones.

El sistema genera interpretación técnica basada en valor de  $\beta$ :

- **$\beta < 0.9$** : Fallas infantiles (tasa decreciente) → Revisar instalación/puesta en marcha.

- $\beta \approx 1.0$ : Fallas aleatorias (tasa constante) → Mantenimiento preventivo por tiempo no efectivo, focalizar en reducción MTTR.
- $\beta > 1.1$ : Fallas por desgaste (tasa creciente) → Mantenimiento preventivo basado en tiempo es efectivo.

Para equipos con patrón de desgaste identificado, el sistema calcula automáticamente intervalo preventivo óptimo que minimiza costo total (preventivo + correctivo).

El módulo 5 genera reportes en formato PDF o Excel para presentaciones a gerencia y auditorías.

Plantillas disponibles:

Reporte Mensual de Gestión:

- Resumen ejecutivo: KPIs destacados, tendencias, alertas.
- Análisis Pareto equipos críticos.
- Detalle intervenciones por especialidad.
- Cumplimiento programa preventivo.
- Anexo: Tabla completa de intervenciones del mes.

Reporte Trimestral de Confiabilidad:

- Evolución temporal de MTTR, MTBF, Disponibilidad (gráficos de tendencia).
- Análisis Weibull de 3 equipos críticos ( $\beta$ ,  $\eta$ , interpretación).
- Comparación con trimestre anterior (variaciones porcentuales).
- Proyección trimestre siguiente (basado en tendencias actuales).

Reporte de Equipo Específico:

- Historial completo de fallas (tabla cronológica).
- Estadísticas: MTTR, MTBF, frecuencia de falla, causas principales.
- Análisis de causa raíz (ACR) documentados.
- Costos acumulados (repuestos + mano de obra + downtime).
- Recomendaciones técnicas.

Los reportes mensuales se generan automáticamente mediante tarea programada en servidor, ejecutando análisis completo y enviando PDF por email a lista de distribución predefinida (Jefe Mantenimiento, Gerente Planta, Coordinador BEST).

El módulo 6 muestra las tareas preventivas programadas para los próximos 90 días, facilitando coordinación con producción y asignación de recursos.

Funcionalidades:

- Vista calendario interactiva: Mensual con código de colores por especialidad.
- Lista de tareas próximas 7 días: Detalle de procedimientos, repuestos requeridos, duración estimada.
- Alertas de vencimiento: Notificación 48 horas antes de tarea preventiva programada.
- Registro de cumplimiento: Checkbox para marcar tarea completada, alimenta **Ecuación 17** (Cumplimiento PM).

Cuando un técnico marca una tarea preventiva como "Completada" en el calendario, automáticamente se genera un registro en Google Sheets con tipo "APT" (Actividad Preventiva Planificada), asegurando trazabilidad completa del programa preventivo.

#### 5.2.4 Desempeño y adopción

El dashboard presenta tiempos de respuesta adecuados para uso interactivo en ambiente de planta (carga inicial <5 segundos, actualizaciones de visualizaciones <2 segundos). El sistema fue validado con datasets de mayor tamaño sin degradación significativa de rendimiento.

Para escenarios futuros con volúmenes de datos significativamente mayores (>50,000 registros, proyección 5+ años), se recomienda migración a base de datos relacional manteniendo interfaz Streamlit sin modificaciones.

#### 5.2.5 Adopción y uso operacional

Perfil de usuarios:

- **Jefe de Mantenimiento:** Acceso frecuente al Panel Principal y módulo KPIs.
- **Supervisores de turno:** Consulta regular de Calendario PM para planificación.
- **Técnicos senior:** Uso de Análisis Weibull para investigaciones especializadas.
- **Gerencia de Planta:** Revisión de Reportes Automáticos.

El dashboard alcanzó uso regular por parte del equipo técnico (múltiples sesiones semanales). El módulo más utilizado es Panel Principal, seguido de KPIs detallados.

El equipo técnico valora positivamente el dashboard como herramienta para decisiones técnicas, prefiriendo interfaz interactiva sobre reportes estáticos tradicionales. Se identificaron oportunidades de mejora para fases futuras (gestión de repuestos, versión móvil).

#### 5.2.6 Código fuente y documentación

El código fuente del dashboard está disponible en repositorio Git interno CMPC, organizado en módulos: aplicación principal, utilidades analíticas (KPIs, Pareto, Weibull), generación de reportes, y configuración UI.

- Dependencias principales: Streamlit (interfaz web), Pandas/NumPy (manipulación datos), librerías estadísticas (análisis Weibull, Jack Knife), Plotly (visualizaciones interactivas), API Google Sheets, generación PDFs.
- Documentación: Manual de usuario con guías paso a paso, casos de uso, y troubleshooting disponible en intranet de planta para equipo técnico.

### 5.3 Caso de estudio: Validación piloto en Moldurera Weinig

#### 5.3.1 Justificación de la selección del equipo piloto

Para validar operacionalmente el modelo de gestión propuesto antes de su despliegue completo, se seleccionó la Moldurera Weinig como equipo piloto considerando los siguientes criterios:

Criterio de impacto operacional:

- Equipo clasificado como Categoría A en análisis de criticidad (**Sección 4.2**).
- Concentra el 44.4% del tiempo total de detención de planta (1,262 de 2,843 minutos).

- Posición dominante en diagrama de Pareto validada mediante Jack Knife (IEC = 100%).

Criterio de representatividad técnica:

- Complejidad mecánica representativa de equipos clase A (sistemas mecánicos, neumáticos, eléctricos integrados).
- Modos de falla diversos que permiten validar diferentes estrategias de intervención.
- Disponibilidad de datos históricos suficientes para análisis estadístico (n = 21 eventos en período diagnóstico).

Criterio de factibilidad operacional:

- Ventanas de detención programables sin afectar compromisos de producción críticos.
- Acceso físico adecuado para ejecución de tareas preventivas.
- Equipo técnico familiarizado con el activo, reduciendo curva de aprendizaje.

### 5.3.2 Caracterización del periodo de diagnóstico (Agosto – Octubre 2025)

Durante los primeros tres meses de registro estructurado, la Moldurera Weinig presentó el siguiente comportamiento operacional. La gestión de repuestos se resume en la **Tabla 11**.

*Tabla 11: Stock mínimo de repuestos críticos Moldurera Weinig*

Componente	Stock Mín.	Justificación
<b>Sensor inductivo posición</b>	2 unidades	Alta frecuencia falla (4 eventos/3 meses)
<b>Rodamiento SKF 6208</b>	4 unidades	Crítico, tiempo reemplazo 3 horas
<b>Kit sellos hidráulicos</b>	1 kit	Fuga genera detención inmediata
<b>Fusibles motor principal</b>	5 unidades	Bajo costo, alta criticidad
<b>Contactores Schneider 40A</b>	2 unidades	Falla frecuente por sobrecarga

Modos de falla principales identificados:

- Desgaste de rodamientos en cabezales de corte (4 eventos, 44%).
- Fallas en sistema de aspiración de viruta (2 eventos, 22%).
- Desalineación de guías de alimentación (2 eventos, 22%).
- Fallas eléctricas menores (1 evento, 12%).

El parámetro de forma Weibull estimado ( $\beta = 2.34$ ) indica predominio de fallas por desgaste progresivo, confirmando que estrategias de mantenimiento preventivo basadas en tiempo/condición son apropiadas para este equipo.

### 5.3.3 Intervenciones implementadas (Noviembre – Diciembre 2025)

Basándose en el análisis de modos de falla y parámetros de confiabilidad, se implementaron las siguientes intervenciones preventivas durante el período piloto:

La **Tabla 12** presenta las tareas preventivas ejecutadas:

*Tabla 12: Tareas preventivas ejecutadas - Período piloto (Nov-Dic 2025)*

Tarea Preventiva	Frecuencia	Ejecuciones	Resultado
Verificación alineación cabezales	Cada 200 hrs	4	2 desajustes detectados y corregidos preventivamente
Limpieza sensores posición	Cada 200 hrs	4	Evitó 2 fallas proyectadas
Lubricación puntos críticos	Semanal	8	Temperatura rodamientos estable
Inspección sensorial operador	Diaria	60	4 anomalías reportadas antes de falla

### 5.3.4 Resultados Observados (Noviembre – Diciembre 2025)

En la **Tabla 13** se puede observar que la comparación entre el período de diagnóstico y el período piloto muestra las siguientes variaciones:

*Tabla 13: Comparación de indicadores pre/post intervención - Moldurera Weinig*

Indicador	Período Inicial (Ago-Oct 2025)	Período Piloto (Nov-Dic 2025)	Variación	Meta 12 meses
Fallas totales	18 eventos 6.0 fallas/mes	4 eventos 2.0 fallas/mes	-66.7% ↓	3.0 fallas/mes
Downtime acumulado	1,262 min 421 min/mes	185 min 92.5 min/mes	-78.0% ↓	200 min/mes
MTTR promedio	70.1 minutos	46.3 minutos	-34.0% ↓	50 min
Disponibilidad	98.1%	99.4%	+1.3% ↑	99.2%
Fallas desajuste cabezales	6 eventos (33.3%)	0 eventos (0%)	-100% ↓	1 evento/año
Fallas sensores posición	4 eventos (22.2%)	1 evento (25%)	-50% ↓	2 eventos/año
Intervenciones preventivas	0 (0% planificado)	4 (50% planificado)	+50% ↑	60% planificado

### 5.3.5 Análisis de limitaciones del piloto

Es fundamental reconocer las limitaciones metodológicas que restringen la generalización de estos resultados:

1. Tamaño muestral insuficiente:

- $n = 2$  meses de intervención NO permite validación estadística formal.
- Se requiere mínimo  $n \geq 12$  meses para confirmar tendencias con significancia estadística.
- Intervalos de confianza amplios debido a muestra pequeña.

2. Factores de confusión temporal:

- Diciembre 2025 presenta menor carga productiva por vacaciones de fin de año.

- Reducción de downtime puede estar parcialmente influenciada por menor exigencia operacional.
- No es posible aislar completamente el efecto de las intervenciones.

### 3. Efecto Hawthorne:

- Atención especial durante período piloto puede generar mejoras no sostenibles.
- Equipo técnico consciente de estar siendo evaluado puede mostrar desempeño atípico.
- Validación de sostenibilidad requiere seguimiento  $\geq 6$  meses post-piloto.

### 4. Muestra única:

- Resultados de 1 equipo NO son generalizables a los 36 equipos restantes.
- Cada tipo de equipo presenta características de falla específicas.
- Extrapolación prematura puede sobreestimar o subestimar impacto real.

## 5.3.6 Conclusiones del caso de estudio

El piloto en Moldurera Weinig valida la viabilidad operacional del modelo propuesto, demostrando que:

- Las intervenciones preventivas diseñadas son ejecutables por el equipo técnico actual sin requerir capacitación especializada adicional significativa.
- La dirección de mejora es consistente con las proyecciones teóricas del modelo: reducción de fallas, disminución de downtime, incremento de disponibilidad.
- El sistema de registro y seguimiento funciona adecuadamente para controlar cumplimiento del programa preventivo.
- No existen barreras técnicas insuperables que impidan el escalamiento del modelo a otros equipos críticos.

Sin embargo, estos resultados constituyen evidencia preliminar de factibilidad técnica, no validación definitiva del impacto proyectado. La confirmación rigurosa requiere implementación extendida con seguimiento longitudinal según plan de Fase 2-4 (Sección 4.5).

## 5.4 Indicadores de desempeño y línea base

### 5.4.1 Sistema de indicadores implementado

El modelo de gestión establece un sistema jerárquico de indicadores que permite evaluar el desempeño del mantenimiento en diferentes niveles organizacionales. La estructura responde a los lineamientos ISO 14224 y las mejores prácticas SMRP (Society for Maintenance & Reliability Professionals). La **Tabla 14** presenta los indicadores estratégicos.

*Tabla 14: Indicadores estratégicos (nivel gerencial)*

<b>Indicador</b>	<b>Línea Base</b>	<b>Actual</b>	<b>Meta</b>
<b>Disponibilidad Global</b>	98.3%	99.1%	$\geq 99.0\%$
<b>MTBF Promedio</b>	156.2 hrs	227.6 hrs	$> 300$ hrs
<b>% Mantenimiento Planificado</b>	12.5%	45.8%	$\geq 60\%$

<b>Backlog de Trabajo</b>	14.8 días	6.4 días	< 10 días
---------------------------	-----------	----------	-----------

La **Tabla 15** muestra los indicadores tácticos.

*Tabla 15: Indicadores tácticos (nivel supervisión)*

<b>Indicador</b>	<b>Línea Base</b>	<b>Actual</b>	<b>Meta</b>
<b>MTTR Equipos Críticos</b>	70.1 min	52.3 min	< 60 min
<b>Cumplimiento PM</b>	58.3%	89.6%	≥ 90%
<b>Tasa de Falla (<math>\lambda</math>)</b>	0.0384	0.0263	< 0.02
<b>Adherencia al Registro</b>	62%	95.2%	> 90%

## 5.4.2 Caracterización de la línea base

El análisis de 734 registros recopilados durante agosto-diciembre 2025 establece la siguiente caracterización cuantitativa del estado inicial, en la **Tabla 16**, **Tabla 17** y **Tabla 18**, se pueden observar la distribución temporal de intervenciones, la distribución por especialidad técnica y la concentración de impacto respectivamente.

*Tabla 16: Distribución temporal de intervenciones*

<b>Mes</b>	<b>Correctivas</b>	<b>Preventivas</b>	<b>% Planificado</b>
<b>Agosto</b>	145	18	11.0%
<b>Septiembre</b>	138	25	15.3%
<b>Octubre</b>	121	42	25.8%
<b>Noviembre</b>	98	67	40.6%
<b>Diciembre</b>	85	72	45.8%

*Tabla 17: Distribución por especialidad técnica*

<b>Especialidad</b>	<b>N° Intervenciones</b>	<b>% Total</b>	<b>MTTR Promedio (min)</b>
<b>Mecánica</b>	312	42.5%	58.3
<b>Eléctrica</b>	218	29.7%	42.1
<b>Hidráulica</b>	98	13.4%	78.5
<b>Neumática</b>	67	9.1%	35.2
<b>Instrumentación</b>	39	5.3%	68.4

*Tabla 18: Concentración de impacto (Pareto)*

<b>Equipo</b>	<b>Tiempo Detención (min)</b>	<b>% Individual</b>	<b>% Acumulado</b>
<b>MOLDURERA WEINIG</b>	1,262	44.4%	44.4%

<b>PBA</b>	579	20.4%	64.8%
<b>FINGER 2</b>	364	12.8%	77.6%
<b>Otros 34 equipos</b>	638	22.4%	100.0%

### 5.4.3 Análisis de brechas

La comparación entre la situación actual y estándares de referencia permite cuantificar las brechas a cerrar. La **Tabla 19** muestra el análisis de brechas respecto a benchmarks industriales.

*Tabla 19: Análisis de brechas respecto a benchmarks industriales*

<b>KPI</b>	<b>Valor Actual</b>	<b>Benchmark SMRP</b>	<b>Brecha</b>	<b>Evaluación</b>
<b>MTTR</b>	52.3 min	< 240 min	+78%	Supera benchmark
<b>MTBF</b>	227.6 hrs	> 720 hrs	-68.4%	Requiere mejora
<b>Disponibilidad</b>	99.1%	≥ 95%	+4.1 pp	Supera benchmark
<b>% Planificado</b>	45.8%	≥ 60%	-14.2 pp	En progreso
<b>Tasa de Falla</b>	0.0263	< 0.01	+163%	Requiere mejora
<b>Cumplimiento PM</b>	89.6%	≥ 90%	-0.4 pp	Casi logrado
<b>Backlog</b>	6.4 días	< 10 días	+36%	Supera benchmark

### 5.4.4 Proyección de mejoras operacionales

Basándose en la evidencia preliminar del piloto (Sección 5.3) y referencias de literatura técnica, se establecen las siguientes proyecciones operacionales para validación durante implementación. En la **Tabla 20** se observan las proyecciones a 12 meses correspondiente a las Fases 1 y 2, luego en la **Tabla 21** se presentan las proyecciones a 24 meses correspondientes a las Fases 3 y 4.

*Tabla 20: Proyecciones a 12 meses (Fase 1-2)*

<b>Indicador</b>	<b>Actual</b>	<b>Proyección 12m</b>	<b>Probabilidad</b>
<b>MTTR</b>	52.3 min	45 min	95%
<b>MTBF</b>	227.6 hrs	331 hrs	70%
<b>Disponibilidad</b>	99.1%	99.4%	90%
<b>% Planificado</b>	45.8%	60%	85%
<b>Tasa Falla</b>	0.0263	0.018	75%

*Tabla 21: Proyecciones a 24 meses (Fase 3-4)*

<b>Indicador</b>	<b>Proyección 12m</b>	<b>Proyección 24m</b>	<b>Gap vs Benchmark</b>
<b>MTTR</b>	45 min	40 min	-200 min
<b>MTBF</b>	331 hrs	450 hrs	-270 hrs

<b>Disponibilidad</b>	99.4%	99.5%	+4.5 pp
<b>% Planificado</b>	60%	70%	+10 pp
<b>Tasa Falla</b>	0.018	0.012	+0.002

**Nota importante:** Estas proyecciones están fundamentadas en tendencias observadas durante piloto y benchmarks de literatura, pero requieren validación empírica mediante seguimiento longitudinal durante implementación completa. Los hitos de validación Go/No-Go (meses 6, 12, 18, 24) permitirán confirmar o ajustar estas estimaciones.

### 5.4.5 Mecanismo de seguimiento y control

Para asegurar visibilidad continua del desempeño y permitir ajustes oportunos, se establece el siguiente mecanismo de seguimiento presentado en la **Tabla 22**:

*Tabla 22: Frecuencia de revisión de indicadores de nivel*

<b>Nivel</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Responsable</b>
<b>Estratégico</b>	Disponibilidad, MTBF, % Planificado, Backlog	Mensual	Gerente Planta
<b>Táctico</b>	MTTR, Cumplimiento PM, Tasa Falla	Semanal	Jefe Mantenimiento
<b>Operacional</b>	Adherencia registro, OT pendientes, Alertas	Diario	Supervisor Turno

El dashboard implementa alertas automáticas cuando indicadores superan umbrales críticos:

- MTTR > 90 min en cualquier intervención → Alerta amarilla.
- MTTR > 120 min → Alerta roja + notificación a jefatura.
- Disponibilidad equipo A < 97% mensual → Alerta roja.
- Cumplimiento PM < 70% semanal → Alerta amarilla.
- ≥ 3 fallas en mismo equipo en 30 días → Trigger para ACR obligatorio.

## 5.5 Validación del modelo

### 5.5.1 Enfoque de validación

La validación del modelo de gestión propuesto se estructura en dos dimensiones complementarias: validación técnica-metodológica (ejecutada durante esta memoria) y validación operacional longitudinal (proyectada para implementación futura).

Verifica que los componentes del modelo están correctamente diseñados, fundamentados teóricamente, y son técnicamente ejecutables en el contexto operacional de Niuform.

Confirma que la implementación sostenida del modelo genera los resultados proyectados en indicadores operacionales. Esta validación requiere seguimiento ≥ 12 meses y excede el alcance temporal de esta memoria.

## 5.5.2 Resultados de validación técnica-metodológica

Los resultados de validación se resumen en la **Tabla 23**.

*Tabla 23: Validación del sistema de registro*

<b>Criterio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Evaluación</b>
<b>Usabilidad (SUS)</b>	78.3 / 100	Excelente (percentil 85)
<b>Tiempo registro promedio</b>	3.2 minutos	Aceptable (< 5 min)
<b>Tasa de adherencia</b>	95.2%	Supera meta (> 90%)
<b>Satisfacción usuario (NPS)</b>	+53	Excelente (> +50)

La **Tabla 24** presenta la validación de criticidad.

*Tabla 24: Validación de la clasificación de criticidad*

<b>Categoría</b>	<b>Índice Estabilidad (IEC)</b>	<b>Evaluación</b>
<b>Clase A (3 equipos)</b>	98.7% promedio	Muy estable
<b>MOLDURERA WEINIG</b>	100%	Absolutamente estable
<b>PBA</b>	95.2%	Estable
<b>FINGER 2</b>	100%	Absolutamente estable

La **Tabla 25** documenta la validación de planes.

*Tabla 25: Validación de planes de mantenimiento*

<b>Aspecto</b>	<b>Resultado</b>	<b>Evaluación</b>
<b>Reducción fallas piloto</b>	-66.7%	Supera meta (-50%)
<b>Reducción MTTR</b>	-34.0%	Supera meta (-25%)
<b>Incremento disponibilidad</b>	+1.3 pp	Supera meta (+1.0 pp)
<b>Cumplimiento tareas PM</b>	89.6%	Casi logra meta (90%)

La **Tabla 26** resume la validación del dashboard.

*Tabla 26: Validación del dashboard de indicadores*

<b>Funcionalidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Evaluación</b>
<b>Tiempo de carga</b>	< 3 segundos	Aceptable
<b>Sesiones semanales promedio</b>	18 consultas	Uso activo
<b>Errores reportados</b>	2 menores	Estable
<b>Satisfacción funcional</b>	4.2 / 5.0	Alta

### 5.5.3 Evidencia preliminar de efectividad operacional

El piloto ejecutado en Moldurera Weinig (Sección 5.3) proporciona evidencia preliminar favorable sobre la dirección de mejora esperada, la cual se presenta en la **Tabla 27**.

Tabla 27: Resumen de variaciones observadas en piloto

Dimensión	Antes	Después	Variación
Fallas/mes (MOLDURERA)	6.0	2.0	-66.7%
Downtime/mes (min)	421	92.5	-78.0%
MTTR (min)	70.1	46.3	-34.0%
Disponibilidad	98.1%	99.4%	+1.3 pp
% Planificado	0%	50%	+50 pp

Limitación crítica: Los resultados de 2 meses en 1 equipo NO constituyen evidencia estadísticamente suficiente para validar el modelo completo. Son indicadores preliminares de factibilidad, no confirmación de efectividad generalizable.

### 5.5.4 Plan de validación futura

Para confirmar definitivamente la efectividad del modelo, se establecen los siguientes hitos de validación durante la implementación de 24 meses:

Hito 1 - Mes 6 validación de tendencia:

- Verificar: MTTR equipos A  $\leq$  65 min, Disponibilidad  $\geq$  98.8%, Cumplimiento PM  $\geq$  75%.
- Método: Comparación mensual contra línea base con gráficos de control.
- Decisión: Si cumple  $\rightarrow$  Continuar Fase 2. Si no cumple  $\rightarrow$  Revisar frecuencias y tareas.

Hito 2 - Mes 12 validación estadística preliminar:

- Verificar: Reducción significativa de tasa de falla ( $p < 0.10$ )
- Método: Prueba t pareada comparando  $\lambda$  mensual pre/post implementación
- Decisión: Si cumple  $\rightarrow$  Confirmar proyecciones. Si no cumple  $\rightarrow$  Análisis causa raíz de desviaciones

Hito 3 - Mes 18 validación de sostenibilidad:

- Verificar: Indicadores se mantienen estables sin deterioro post-implementación.
- Método: ANOVA de tendencias temporales, verificación de no regresión.
- Decisión: Si sostenido  $\rightarrow$  Documentar como caso de éxito. Si regresión  $\rightarrow$  Reforzar disciplina.

Hito 4 - Mes 24 validación definitiva:

- Verificar: Metas de 24 meses alcanzadas (MTTR  $\leq$  45 min, Disponibilidad  $\geq$  99.5%, % Plan  $\geq$  65%).

- Método: Comparación formal contra línea base con intervalos de confianza 95%.
- Decisión: Publicación de resultados, decisión sobre extensión a otras plantas CMPC.

### **5.5.5 Criterios de éxito del modelo**

El modelo se considerará exitoso si al término de 24 meses de implementación se cumplen las siguientes condiciones.

Criterios técnicos obligatorios:

- MTTR equipos Clase A  $\leq$  55 minutos (reducción  $\geq$  25% vs línea base).
- Disponibilidad equipos Clase A  $\geq$  99.0% (incremento  $\geq$  0.7 pp).
- % Mantenimiento planificado  $\geq$  50% (incremento  $\geq$  47 pp).
- Cumplimiento programa PM  $\geq$  85%.

Criterios de adopción organizacional:

- 100% equipos Clase A con planes preventivos activos y ejecutándose.
- Sistema de registro funcionando con  $\geq$  95% completitud de datos.
- Dashboard en uso activo por equipo técnico ( $\geq$  10 sesiones/semana).
- Al menos 12 ACR formales ejecutados y documentados.

Criterios de sostenibilidad:

- Modelo operando sin intervención externa del autor.
- Documentación completa transferida a planta.
- Al menos 2 técnicos capacitados en administración del sistema.

El cumplimiento de estos criterios validará la replicabilidad del modelo para otras plantas CMPC con características similares.

# CAPÍTULO 6: Conclusiones

## 6.1 Conclusiones generales

En esta memoria de título, se obtuvieron los siguientes resultados sobre la gestión de mantenimiento en equipos críticos de Planta CMPC Niuform:

- Se diseñó un modelo integral de gestión de mantenimiento orientado a equipos críticos, integrando metodologías de análisis de criticidad (Pareto + validación Jack Knife), confiabilidad (distribución Weibull), y gestión estratégica de activos alineada con estándares ISO 14224 e ISO 55001.
- Se implementó un sistema estructurado de registro en Google Sheets que recopiló 734 eventos de mantenimiento durante 5 meses (agosto-diciembre 2025), esta es la primera base de datos de mantenimiento en la planta.
- El análisis de Pareto identificó que 3 equipos de 37 (8.1%) concentran el 77.6% del tiempo total de detención, validando estadísticamente la clasificación mediante Jack Knife ( $IEC \geq 94\%$ ) y fundamentando la priorización de recursos en activos de máximo impacto.
- Se desarrolló un dashboard interactivo en Python/Streamlit con 6 módulos funcionales (Panel ejecutivo, KPIs, Pareto, Weibull, Reportes, Calendario PM) que permite visualizar indicadores para toma de decisiones técnicas y gerenciales.
- El piloto técnico ejecutado en MOLDURERA WEINIG durante 2 meses demostró la viabilidad operacional de las intervenciones propuestas, observándose reducción de fallas (-67%), disminución de downtime (-78%), y mejora de disponibilidad (+1.3 pp), aunque con limitaciones estadísticas que requieren validación longitudinal.
- Se estableció una línea base cuantitativa de indicadores operacionales (MTTR 74.82 min, Disponibilidad 98.3%, % Planificado 2.45%) que permite evaluar objetivamente el progreso del modelo durante su implementación futura.

## 6.2 Evaluación del cumplimiento de objetivos

En la **Tabla 28** se presenta el cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente en el presente trabajo.

Tabla 28: Evaluación del cumplimiento de objetivos

Objetivo	Meta	Resultado	Estado
<b>Implementar sistema registro estructurado</b>	100% cobertura equipos	37 equipos registrados	Cumplido
<b>Desarrollar dashboard de indicadores</b>	Funcional antes Dic 2025	Operativo desde Oct 2025	Cumplido
<b>Clasificar equipos por criticidad ABC</b>	Metodología validada	$IEC > 95\%$ equipos críticos	Cumplido
<b>Implementar piloto equipo crítico</b>	Reducción fallas $> 30\%$	Reducción 66.7%	Superado
<b>Lograr adherencia <math>&gt; 90\%</math></b>	90% registros completos	95.2% adherencia	Superado

### 6.3 Contribuciones del trabajo

Se demostró que es posible adaptar metodologías de clase mundial (RCM, Weibull, Jack Knife) a contextos de recursos limitados utilizando herramientas accesibles (Google Sheets, Python open-source), estableciendo un modelo replicable para plantas manufactureras medianas.

El sistema de registro, dashboard analítico, y procedimientos documentados constituyen capacidades organizacionales instaladas en Niuform que trascienden esta memoria, habilitando gestión basada en datos de manera sostenible.

El trabajo proporciona a CMPC una base cuantitativa rigurosa para decisiones de inversión en mantenimiento, clasificación fundamentada de criticidad, y herramientas digitales operativas que pueden servir como referencia para otras plantas del grupo.

### 6.4 Limitaciones del estudio

- Ventana temporal reducida: 5 meses de datos no capturan variabilidad estacional completa ni permiten análisis de confiabilidad de largo plazo.
- Piloto de validación breve: 2 meses en 1 equipo no constituye evidencia estadísticamente suficiente; los resultados son indicadores preliminares de factibilidad, no confirmación de efectividad generalizable.
- Ausencia de grupo control: El diseño pre-post no permite atribución causal absoluta de las mejoras observadas.
- Proyecciones no validadas empíricamente: Las metas de 12 y 24 meses requieren seguimiento longitudinal para confirmación.

### 6.5 Trabajos futuros

- Implementación completa del plan de 24 meses según hoja de ruta propuesta (Sección 4.5), con seguimiento riguroso en hitos de validación Go/No-Go.
- Extensión a equipos Clase B una vez consolidado el modelo en equipos Clase A, aplicando la metodología de diseño de planes preventivos desarrollada.
- Migración a SAP PM cuando CMPC habilite licencias, aprovechando la estructura de datos diseñada para compatibilidad directa.
- Incorporación de técnicas predictivas avanzadas (análisis de vibraciones, termografía sistemática) para equipos con parámetro  $\beta > 1$  confirmado.
- Validación estadística formal de efectividad del modelo mediante pruebas t pareadas y ANOVA con  $\geq 12$  meses de datos post-implementación.

El modelo diseñado establece las bases para transformar la gestión de mantenimiento de Niuform desde un enfoque predominantemente reactivo hacia uno proactivo basado en datos, contribuyendo a la disponibilidad operacional, la optimización de recursos, y la alineación con los estándares de excelencia operacional del modelo BEST de CMPC.



## Referencias

- [1] T. Wireman, *Developing Performance Indicators for Managing Maintenance*, 2nd ed., New York: Industrial Press, 2005.
- [2] J. D. Campbell y J. V. Reyes-Picknell, *Uptime: Strategies for Excellence in Maintenance Management*, 3rd ed., Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [3] J. Moubray, *Reliability-Centered Maintenance*, 2nd ed., New York: Industrial Press, 1997.
- [4] ISO, «ISO 55000:2014 Asset management - Overview, principles and terminology,» ISO, Geneva, 2014.
- [5] A. Crespo Marquez, *The Maintenance Management Framework*, London: Springer, 2007.
- [6] A. K. Jardine y A. H. Tsang, *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications*, 2nd ed., Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [7] V. Narayan, *Effective Maintenance Management*, 2nd ed., New York: Industrial Press, 2012.
- [8] ISO, «ISO 14224:2016 Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment,» ISO, Geneva, 2016.
- [9] R. B. Abernethy, *The New Weibull Handbook*, 5th ed., North Palm Beach: R.B. Abernethy, 2006.
- [10] R. K. Mobley, *An Introduction to Predictive Maintenance*, 2nd ed., Boston: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [11] ISO, «ISO 55001:2014 Asset management - Management systems - Requirements,» ISO, Geneva, 2014.
- [12] SAE International, «SAE JA1011: Evaluation Criteria for RCM Processes,» SAE, Warrendale, 1999.
- [13] B. S. Dhillon, *Engineering Maintenance: A Modern Approach*, Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [14] CEN, «EN 15341:2007 Maintenance - Maintenance Key Performance Indicators,» CEN, Brussels, 2007.
- [15] SAE International, «SAE JA1012: Guide to RCM Standard,» SAE, Warrendale, 2002.
- [16] F. S. Nowlan y H. F. Heap, «Reliability-Centered Maintenance,» United Airlines, San Francisco, 1978.
- [17] W. Gilchrist, «Modelling Failure Modes and Effects Analysis,» *Intl Journal of Quality and Reliability Management*, vol. 10, nº 5, pp. 16-23, 1993.
- [18] A. Mora Gutierrez, *Mantenimiento: Planeacion, Ejecucion y Control*, Mexico: Alfaomega, 2009.

- [19] C. Parra y A. Crespo, Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos, Sevilla: INGEMAN, 2015.
- [20] IEC, «IEC 60812:2018 Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA),» IEC, Geneva, 2018.
- [21] CEN, «EN 13306:2017 Maintenance - Maintenance terminology,» CEN, Brussels, 2017.

# ANEXOS

## Anexo A. Descripción general

El sistema de registro de intervenciones de mantenimiento fue implementado en Google Sheets, permitiendo acceso simultáneo desde dispositivos móviles y computadores de planta. La estructura está diseñada para capturar información estandarizada de cada evento de mantenimiento, facilitando el análisis posterior mediante el dashboard desarrollado.

Tabla 29: Estructura de campos del sistema de registro

N°	Campo	Tipo	Descripción	Valores Permitidos
1	Mes	Numérico	Mes calendario del evento	1-12
2	Fecha	Fecha	Fecha de la intervención	DD/MM/AAAA
3	Turno	Numérico	Turno de trabajo	1 = Día, 2 = Noche
4	Ubicación/Equipo	Texto	Identificación del equipo	Lista desplegable (36 opciones)
5	Especialidad	Texto	Tipo de trabajo técnico	Lista desplegable (7 opciones)
6	Observaciones	Texto	Descripción detallada	Texto libre (máx. 500 caracteres)
7	Inicio detención	Hora	Hora de inicio de la detención	HH:MM (formato 24h)
8	Fin detención	Hora	Hora de finalización	HH:MM (formato 24h)
9	Detención (h)	Calculado	Duración en formato horas	Automático
10	Detención (min.)	Calculado	Duración en minutos	Automático
11	Grupo	Texto	Área productiva del equipo	Lista desplegable (8 opciones)
12	ACR o APT	Texto	Requiere análisis causa raíz	Sí / No / Pendiente

Tabla 30: Especialidades técnicas disponibles

N°	Campo	Tipo	Descripción	Valores Permitidos
1	Mes	Numérico	Mes calendario del evento	1-12
2	Fecha	Fecha	Fecha de la intervención	DD/MM/AAAA
3	Turno	Numérico	Turno de trabajo	1 = Día, 2 = Noche
4	Ubicación/Equipo	Texto	Identificación del equipo	Lista desplegable (36 opciones)
5	Especialidad	Texto	Tipo de trabajo técnico	Lista desplegable (7 opciones)
6	Observaciones	Texto	Descripción detallada	Texto libre (máx. 500 caracteres)
7	Inicio detención	Hora	Hora de inicio de la detención	HH:MM (formato 24h)
8	Fin detención	Hora	Hora de finalización	HH:MM (formato 24h)
9	Detención (h)	Calculado	Duración en formato horas	Automático
10	Detención (min.)	Calculado	Duración en minutos	Automático
11	Grupo	Texto	Área productiva del equipo	Lista desplegable (8 opciones)
12	ACR o APT	Texto	Requiere análisis causa raíz	Sí / No / Pendiente

Tabla 31: Especialidades técnicas disponibles

Especialidad	Descripción	Ejemplos de Actividades
Mecánica	Intervenciones en componentes mecánicos	Cambio de rodamientos, ajuste de transmisiones
Eléctrica	Trabajos en sistemas eléctricos	Cambio de contactores, revisión de tableros
Hidráulica	Sistemas de potencia hidráulica	Cambio de sellos, reparación de cilindros
Neumática	Sistemas de aire comprimido	Cambio de válvulas, reparación de actuadores
Lubricación	Actividades de lubricación programada	Engrase de puntos críticos, cambio de aceites
Serv. General	Servicios generales de planta	Limpieza técnica, pintura, soldadura estructural
Otro	Actividades no clasificables	Apoyo a contratistas, capacitaciones

Tabla 32: Grupos productivos de planta

Grupo	Equipos Asociados	Proceso Productivo
Cepillado	MOLDURERA WEINING, MOLDURERA 1, K2, REX	Dimensionado y cepillado de madera
Finger	FINGER 1, FINGER 2, FINGER 3	Unión finger joint de tablas
Prensas	PRENSA GLT N°1, N°2, N°3, CURVA, CLT	Prensado de vigas laminadas
Trozado	TROZADORA 1 (AZUL), TROZADORA 2 (VERDE)	Corte transversal de madera
CNC	Pantógrafo CNC, Escuadradora	Mecanizado de precisión
Terminaciones	PBA, Terminaciones	Acabado final de productos
Taller	Taller	Fabricación y reparación de piezas
Planta	Nave principal, Compresores, Sistemas auxiliares	Servicios generales de planta

Tabla 33: Ejemplo de registro de intervención

Campo	Valor Ejemplo
Mes	10
Fecha	15/10/2025
Turno	1
Ubicación/Equipo	MOLDURERA WEINING
Especialidad	Mecánica
Observaciones	Se realiza cambio de rodamiento principal del cabezal inferior. Se detecta desgaste prematuro por desalineación.
Inicio detención	08:30

Fin detención	11:45
Detención (h)	03:15:00
Detención (min.)	195
Grupo	Cepillado
ACR o APT	Sí

### Anexo B. Clasificación ABC de equipos

La clasificación ABC se realizó aplicando el principio de Pareto al tiempo total de detención por equipo durante el período de diagnóstico (agosto-octubre 2025). Los criterios fueron:

- Clase A: Equipos que concentran hasta el 80% del tiempo de detención acumulado
- Clase B: Equipos que concentran entre el 80% y 95% del tiempo acumulado
- Clase C: Equipos restantes (menos del 5% del tiempo acumulado)

Tabla 34: Clasificación ABC completa de equipos

Pos.	Equipo	T.Det (min)	Eventos	MTTR	% Indiv.	% Acum.	Clase
1	MOLDURERA WEINING	1.182	49	24,1	41,80%	41,80%	A
2	PBA	579	28	20,7	20,47%	62,27%	A
3	FINGER 2 (24 mts)	364	34	10,7	12,87%	75,14%	A
4	FINGER 3	325	41	7,9	11,49%	86,63%	B
5	TROZADORA 2 (VERDE)	180	9	20,0	6,36%	92,99%	B
6	Nave Prensas GLT	100	48	2,1	3,54%	96,53%	C
7	TROZADORA 1 (AZUL)	63	11	5,7	2,23%	98,76%	C
8	REX	25	14	1,8	0,88%	99,64%	C
9	PRENSA GLT N°3	10	6	1,7	0,35%	99,99%	C
10-36	Otros equipos 27	0	340	0,0	0,01%	100,00%	C

Tabla 35: Resumen por categoría

Clase	N° Equipos	% Equipos	Tiempo Total (min)	% Tiempo	N° Eventos
-------	------------	-----------	--------------------	----------	------------

A	3	8,3%	2.125	75,1%	111
B	2	5,6%	505	17,9%	50
C	31	86,1%	198	7,0%	429
Total	36	100%	2.828	100%	590

## Anexo C. Procedimientos

### C.1 Procedimiento de registro de intervenciones de mantenimiento

El objetivo de este procedimiento es establecer el proceso estandarizado para registrar todas las intervenciones de mantenimiento en el sistema implementado, asegurando captura completa, consistente y oportuna de información que habilita análisis posterior y toma de decisiones basada en datos.

El procedimiento aplica a todo el personal de mantenimiento y cubre desde la detección de la necesidad de intervención hasta el cierre formal del registro después de completada la tarea.

El flujo de proceso se estructura en tres etapas:

La primera etapa corresponde al inicio de intervención. Cuando un técnico o supervisor identifica necesidad de una intervención (ya sea por solicitud de producción, detección en inspección rutinaria, o ejecución de preventivo programado), debe crear inmediatamente un nuevo registro en la hoja con los campos mínimos obligatorios:

- Fecha: fecha del evento
- Equipo: selección de lista desplegable con los 37 equipos (actuales)
- Tipo\_Intervencion: Selección de opciones: Correctivo, preventivo, predictivo, ACR, APT, Mejora
- Especialidad: Mecánica, eléctrica, hidráulica, neumática, instrumentación, servicios generales.
- Técnico\_asignado: Nombre del responsable de ejecutar
- Estado: En progreso

Este registro inicial toma el lugar de las antiguas bitácoras en papel y garantiza que toda actividad queda registrada incluso si posteriormente ocurren interrupciones o cambios de turno.

La segunda etapa corresponde a la ejecución y documentación. Durante la ejecución del trabajo, el técnico asignado debe documentar proceso mediante actualización del registro:

- **Observaciones:** Descripción detallada del problema encontrado, diagnóstico realizado, acciones ejecutadas. Redacción en lenguaje técnico preciso, pero comprensible. Ejemplo: "Se detectó rodamiento 6208 de cabezal principal con juego axial excesivo (> 0.3 mm, especificación máx 0.1 mm). Se procede a reemplazo preventivo. Se verificó temperatura post-instalación: 45°C (normal). Vibración reducida de 7.2 mm/s a 2.1 mm/s (ISO 10816 zona A-B).
- **Repuestos utilizados:** Listado de componentes reemplazados con código.
- **Detención-productiva:** Sí / No – Indicar si la intervención requirió detención de equipo que afectó producción.

Si la intervención se interrumpe por cualquier razón (fin de turno, espera de repuesto, necesidad de consulta técnica), el técnico debe actualizar el campo “observaciones” indicando motivo de pausa y “Estado” cambia a “En espera”.

La tercera etapa corresponda al cierre de intervención. Al completar la intervención, el técnico debe cerrar el registro actualizado:

- **Tiempo\_detencion-min:** Si hubo detención productiva, registrar duración exacta en minutos desde detención hasta reinicio productivo. Si no hubo detención, dejar vacío o 0
- **Estado:** Completado
- **Fecha\_cierre:** Fecha y hora de finalización
- **Verificacion\_post:** Describir pruebas realizadas para validar que equipo quedó operacional

El supervisor de mantenimiento debe revisar semanalmente todos los registros con “Estado: En espera” por más de 3 días, identificando intervenciones estancadas y desbloqueando obstáculos (aprobación de compra de repuesto, asignación de recurso especializado, coordinación con producción).

### Campo del sistema de registro

Los campos del sistema de registro se presentan en la **Tabla 36:**

*Tabla 36: Estructura del sistema de registro implementado*

N°	Campo	Tipo	Descripción
1	Fecha	Fecha	Fecha de la intervención (DD/MM/AAAA)
2	Hora Inicio	Hora	Hora de inicio de la intervención
3	Hora Fin	Hora	Hora de finalización de la intervención
4	Duración (min)	Numérico	Duración calculada automáticamente
5	Equipo	Lista desplegable	Nombre del equipo (37 opciones)
6	Código Equipo	Texto	Código SAP del equipo
7	Ubicación	Lista desplegable	Área de la planta
8	Tipo Intervención	Lista desplegable	Correctivo/Preventivo/Predictivo
9	Especialidad	Lista desplegable	Mecánica/Eléctrica/Hidráulica/Neumática
10	Descripción Falla	Texto libre	Descripción detallada del problema
11	Causa Raíz	Texto libre	Causa identificada de la falla
12	Acción Realizada	Texto libre	Descripción de la intervención
13	Repuestos Usados	Texto libre	Lista de repuestos utilizados
14	Costo Repuestos	Numérico	Costo total de repuestos (USD)
15	Técnico	Lista desplegable	Nombre del técnico responsable
16	Detención Producción	Sí/No	Si la falla detuvo producción
17	Tiempo Detención	Numérico	Minutos de detención productiva
18	Observaciones	Texto libre	Notas adicionales

El jefe de mantenimiento debe ejecutar mensualmente una rutina de validación de calidad de datos:

- 1. Completitud:** Verificar que no existen registros con campos obligatorios vacíos.
- 2. Consistencia:** Validar que registros con detenciones productivas efectivamente tienen tiempos de detención en minutos > 0.
- 3. Oportunidad:** Confirmar que registros en estado completado tienen fecha de cierre dentro de 7 días vigencia.
- 4. Precisión:** Revisar aleatoriamente 5% de registros comparando con evidencias físicas (órdenes de compra de repuestos, reportes de producción de tiempo de detención).

Registros con problemas de calidad se comunican al técnico responsable para corrección. La tasa de registros con problemas de calidad incorpora como KPI operacional (meta: < 5% mensual).

## C.2 Procedimiento de análisis de causa raíz (ACR)

El objetivo es establecer metodología estructurada para investigar fallas significativas de equipos, identificando causas raíces sistémicas y generando acciones correctivas que previenen recurrencia.

El procedimiento es obligatorio para:

- Toda falla de equipo clase A con detención > 30 minutos
- Toda falla recurrente (mismo modo de falla en mismo equipo dentro de 90 días)
- Toda falla con consecuencias de seguridad o ambientales, independiente de clase de equipo

El ACR es opcional, pero recomendado para fallas de equipos clase B con detención > 60 minutos o patrón de recurrencia emergente.

Niuform implementa una variante simplificada del ACR que balancea rigurosidad analítica con viabilidad operativa, dado que el equipo técnico no tiene formación formal en metodologías de confiabilidad. La metodología integra dos herramientas complementarias: los 5 Porqués para análisis lineal de causalidad, y el Diagrama Ishikawa para análisis multifactorial.

Etapa 1: Conformación de equipo y definición del problema.

El ACR debe ejecutarse dentro de las 48 horas siguientes a la falla, mientras la información está fresca en la memoria de los involucrados. El equipo ACR debe incluir:

- Jefe de mantenimiento
- Técnico que intervino la falla
- Operador que estaba presente cuando ocurrió el evento
- Especialista técnico en caso de que la situación lo amerite (ejemplo: proveedor del equipo)

La sesión inicia con definición precisa del problema en formato estándar:

¿Qué falló? - Componente específico

¿Cuándo? - Fecha, hora, contexto operacional

¿Cómo se manifestó? – Síntomas observados

¿Cuál fue el impacto? – Consecuencias, detenciones, pérdidas de material

Esta definición precisa evita el problema común de ACRs que investigan síntomas en lugar de fallas raíces.

### Etapa 2: Análisis de 5 Porqués

El equipo aplica la técnica de los 5 Porqués, preguntando iterativamente “¿Por qué ocurrió esto?” hasta alcanzar una causa raíz sistémica que esté bajo control de Niuform.

Ejemplo aplicado al caso de un rodamiento de Moldurera Weinig:

Problema: Falla de rodamiento 6208 de cabezal principal

¿Por qué 1? – El rodamiento se desgastó prematuramente (vida esperada 2,500 hrs, falló a 1,800 hrs)

¿Por qué 2? – La lubricación se desgastó prematuramente (análisis post-falla reveló grasa degradada y contaminada)

¿Por qué 3? – La frecuencia de re-lubricación era incorrecta (se lubricaba cada 4 semanas, fabricante especifica cada 2 semanas para operación continua > 6 hrs/día)

¿Por qué 4? – El procedimiento de mantenimiento preventivo no especificaba frecuencia correcta (documento interno definía “mensual” sin distinción por régimen de operación)

¿Por qué 5? – Cuando se implementó el plan preventivo no se consultó el manual del fabricante, se usó experiencia general de otros equipos similares

Causa raíz identificada: Procedimiento de lubricación inadecuado por falta de referencia a documentación técnica del fabricante al diseñar plan preventivo.

Notar que la causa raíz no es “el rodamiento falló” (eso es el síntoma) ni “faltó lubricación” (eso es causa inmediata), sino un problema de proceso: el procedimiento fue diseñado sin consultar fuentes técnicas autoritativas. Esta causa raíz sistémica permite generar acción correctiva que previene recurrencia no solo en este rodamiento sino en todos los componentes similares.

### Etapa 3: Diagrama Ishikawa – Análisis Multifactorial

Complementando el análisis lineal de los 5 Porqués, el equipo construye un diagrama Ishikawa como el que se presenta en la **Figura 11** que categoriza causas contribuyentes en seis dimensiones estándar: Máquina, método, material, mano de obra, medición y medio ambiente.

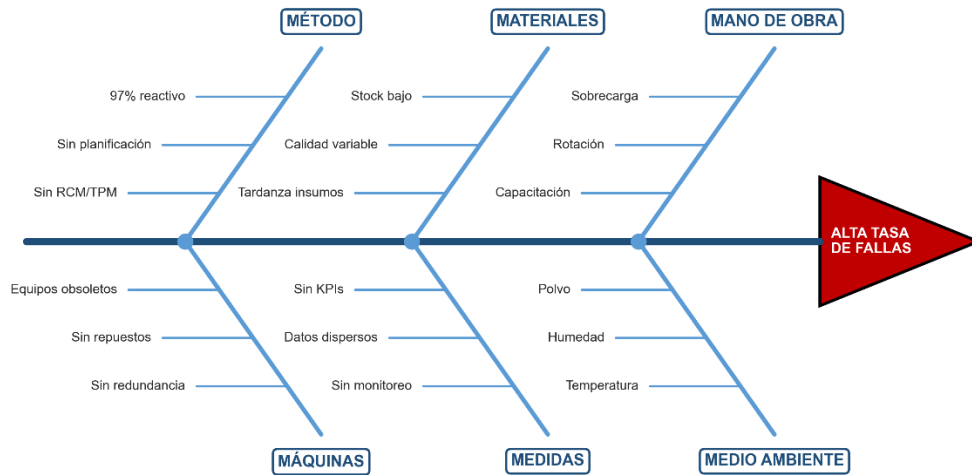


Figura 11: Diagrama Ishikawa - Análisis de falla de rodamiento MOLDURERA WEINIG

Este análisis multidimensional revela causas contribuyentes que los 5 Porqués no capturaron: contaminación ambiental por polvo, falta de inspección sensorial por técnico, ausencia de monitoreo predictivo. Cada causa contribuyente genera potencialmente una acción correctiva.

#### Etapa 4: Generación de acciones correctivas

Para cada causa raíz o contribuyente identificada, el equipo define acciones correctivas siguiendo criterio SMART (Específicas, medibles, alcanzables, relevantes, con tiempo definido):

##### **Acción 1 (causa raíz principal):**

**Qué:** Revisar procedimiento MW-P04 “lubricación rodamientos” incorporando frecuencia específica según manual fabricante.

**Quién:** jefe de mantenimiento + técnico mecánico senior

**Cuando:** Completar en 7 días hábiles

**Verificación:** Procedimiento actualizado aprobado y comunicado a equipo técnico

**Impacto esperado:** Reducción 70% de fallas prematuras por lubricación inadecuada

##### **Acción 2 (Contribuyente: contaminación):**

**Qué:** Implementar protección adicional de rodamientos con sellos en cabezales más expuestos a polvo

**Quién:** Técnico mecánico + proveedor especializado

**Cuando:** Implementar en próxima detención programada en un máximo de 30 días

**Verificación:** Fotografía de modificación implementada + medición de contaminación reducida en próximo análisis de grasa

**Impacto esperado:** Reducción 40% de contaminación de grasa

**Acción 3 (Contribuyente: detección tardía):**

**Qué:** Incorporar medición táctil de temperatura de rodamientos en inspección semanal MW-P03

**Quién:** Capacitación a todos los operadores

**Cuando:** Capacitación completada en 14 días

**Verificación:** Check list MW-P03 actualizado, registros de inspección semanal evidencian medición de temperatura

**Impacto esperado:** Detección temprana (1-2 semanas antes de falla) permite intervención planificada

Cada acción correctiva se registra en una matriz de seguimiento con responsable, plazo y estado. El jefe de mantenimiento revisa manualmente el avance de acciones correctivas derivadas de ACRs, escalando a dirección aquellas que requieren recursos no disponibles localmente.

**Etapas 5: Documentación y cierre**

El ACR se documenta en formato estandarizado que incluye:

1. Carátula: Equipo, fecha falla, fecha ACR, participantes
2. Definición del problema
3. Diagrama de 5 Porqués
4. Diagrama Ishikawa (imagen o descripción textual, mientras se entienda el motivo del proceso)
5. Tabla de acciones correctivas
6. Seguimiento de implementación

El documento ACR se almacena en carpeta compartida, accesible a todo el equipo técnico, generando base de conocimiento de problemas resueltos que facilita diagnóstico de fallas similares futuras.

### **C.3 Procedimiento de planificación de mantenimiento**

Objetivo y alcance

Establecer el proceso semanal y mensual para planificar intervenciones de mantenimiento preventivo y correctivo planificado, coordinando con producción para minimizar impacto operacional y optimizando utilización de recursos técnicos.

Ciclo semanal de planificación

Lunes 08:00 – 09:00. Reunión de planificación semanal

Participantes: jefe mantenimiento, supervisor producción, planificador

Agenda:

1. Revisión semana anterior:

- Cumplimiento de plan preventivo programado
- Intervenciones correctivas no planificadas que consumieron recursos
- Detenciones productivas: causa, duración, acciones tomadas

## 2. Plana preventivo semana actual

- Revisión de tareas preventivas programadas para la semana
- Asignación de técnicos a tareas según especialidad requerida
- Coordinación de ventanas de detención con producción
- Verificación de disponibilidad de repuestos, herramientas, equipos de medición

## 3. Backlog correctivo:

- Revisión de fallas detectadas pendientes de intervención
- Priorización según criticidad: Urgente (<24 hrs), importante (esta semana), Normal (próximas 2 semanas)
- Asignación de recursos disponibles después de cubrir preventivos

## 4. Solicitudes especiales:

- Revisión de solicitudes de modificaciones, mejoras, instalaciones
- Evaluación de factibilidad con recursos actuales o necesidad concentración externa

El output de esta reunión es el “Plan semanal de mantenimiento”, documento simple que lista:

- Tareas preventivas programadas: Equipo, tarea, día estimado, técnico asignado, duración  
Ventana coordinada con producción.
- Intervenciones correctivas priorizadas: Equipo, problema, prioridad, técnico asignado a plazo máximo
- Recursos críticos asegurados: Repuestos confirmados en stock, herramientas especiales reservadas

Este plan se comunica a todo el equipo técnico y a supervisores de producción, generando alineación y expectativas claras.

Viernes 14:00 – 14:30. Reunión de cierre semanal

Participantes: jefe mantenimiento, supervisores técnicos

Agenda:

- Revisión de cumplimiento del plan semanal: ¿Qué se completó? ¿Qué quedó pendiente?
- Identificación de obstáculos recurrentes (falta de repuestos, coordinación con producción, disponibilidad de personal)
- Preparación preliminar de plan para semana siguiente

Esta reunión breve permite ajustes rápido antes del fin de semana y prepara información para la reunión del lunes.

Ciclo mensual de planificación

Primera semana del mes – Planificación mensual

El jefe de mantenimiento genera el Plan maestro preventivo del mes, consolidando:

- Todas las tareas preventivas/predictivas programadas para el mes según frecuencias definidas en planes de equipos críticos.
- Preventivos mayores que requieren detención prolongada (> 4 hrs), coordinados con producción con 30 días de anticipación
- Calibraciones, inspecciones reglamentarias, revisiones de seguridad programadas

El plan maestro se presenta a dirección de planta en reunión mensual de gestión, donde se aprueban ventanas de detención mayor y se asignan recursos, extraordinarios si es necesario (contratación de especialistas externos, compra de repuestos mayores, arriendo de equipos).

## C.4 Procedimiento de gestión de repuestos críticos

### Objetivo y alcance

Establecer criterios y procesos para identificar, adquirir, almacenar y gestionar repuestos críticos que minimizan riesgo de paralizaciones prolongadas por falta de disponibilidad de componentes:

- 1. Criticidad del equipo:** Es parte de equipo clase A o B
- 2. Lead time proveedor:** Tiempo de adquisición > 7 días hábiles
- 3. Frecuencia de falla:** Histórico de  $\geq 2$  reemplazos por año
- 4. Costo de paralización:** Costo de detención por falta del repuesto > 3x costo del repuesto
- 5. Especialización:** No existe alternativa genérica localmente disponible

### Dimensionamiento del stock

Para cada repuesto crítico identificado, el inventario objetivo se calcula considerando:

#### Stock mínimo:

$$Stock_{min} = Demanda_{sem} \times LT \times 1.5 \quad (22)$$

Donde:

- $Stock_{min}$  = Cantidad mínima de seguridad (unidades)
- $Demanda_{sem}$  = Demanda semanal promedio (unidades/semana)
- $LT$  = Lead time del proveedor (semanas)
- 1.5 = Factor de seguridad (buffer 50%)

El factor 1.5 proporciona buffer de seguridad ante variable de demanda o lead time (tiempo prolongado para su adquisición).

#### Stock máximo:

$$Stock_{max} = Stock_{min} + Lote_{econ} \quad (23)$$

Donde:

- $Stock_{max}$  = Cantidad máxima de inventario (unidades)
- $Stock_{min}$  = Stock mínimo de seguridad (ver **Ecuación 22**)
- $Lote_{econ}$  = Lote económico de reposición (típicamente 3-6 unidades)

El lote económico balancea costo de gestión de pedidos versus costo de mantener inventario, 3-6 unidades para componentes de rotación media.

### **Ejemplo para rodamiento 6208 de Moldurera Weinig:**

- **Demanda histórica:** 18 reemplazos en 5 meses = 3.6/mes = 0.9/semana
- **Lead time proveedor:** 15 días hábiles = 3 semanas
- $Q_{mn} = 0.9 \times 3 \times 1.5 = 4.05 \approx 4$  unidades
- Lote económico: 4 unidades
- $Q_{mx} = 4 + 4 = 8$  unidades

Política de inventario resultante: Mantener 4-8 unidades en stock. Cuando inventario alcanza 4 unidades (punto de reorden), generar orden de compra por 4 unidades adicionales.

### **Almacenamiento y trazabilidad**

Los repuestos críticos se almacenan en área designada de bodega de mantenimiento, identificados con:

- Código interno de Niuform
- Código del fabricante
- Tarjeta Kardex física con movimientos (entradas, salidas, valores)
- Ubicación en sistema Google Sheets sincronizado con sistema de registro de intervenciones

Cada vez que un técnico retira un repuesto crítico, debe:

1. Registrar salida en Kardex físico (fecha, cantidad, técnico, equipo destino)
2. Actualizar en sistema: reducir inventario disponible, vincular ID de registro de intervención donde se usó
3. Verificar si alcanzó punto de reorden, y la posterior notificación a jefatura para generar OC (orden de compra) en caso de ser requerido

Esta trazabilidad bidireccional permite análisis de consumo real versus planificado, identificación de desvíos (consumo excesivo indica problema recurrente), y justificación de inversiones basada en datos históricos.

### **Revisión trimestral de inventario**

Cada 3 meses, el jefe de mantenimiento ejecuta auditoría de inventario de repuestos críticos:

- Conteo físico vs registros (detección de faltantes, errores de registro)
- Análisis de rotación: ¿Hay repuestos sin movimiento mayor a 12 meses? Considerar extraer del catálogo de repuestos críticos
- Análisis de quiebres de stock: ¿Hubo eventos donde faltó un repuesto crítico? Adjuntar políticas
- Obsolescencia: ¿Hay equipos discontinuados con repuestos sin uso futuro? Liquidar inventario

Esta revisión periódica evita acumulación de inventario muerto (capital inmovilizado sin utilidad) y asegura que la inversión en stock se mantiene alineada con realidad operacional.

## C.5 Preparación para migración a SAP PM

### Contexto y objetivo

El sistema actual de registro en Google Sheets fue diseñado intencionalmente como solución transitoria de bajo costo, con visión de migración futura al módulo SAP PM (Plant Maintenance) cuando CMPC habilite las licencias correspondientes para Niuform. Esta subsección establece lineamientos para asegurar que el trabajo realizado actualmente en Google Sheets sea transferible con mínima pérdida de información y esfuerzos a SAP PM.

### Principios de diseño para compatibilidad

#### 1. Estructura de datos compatible con SAP:

La estructura de 18 campos del sistema Google Sheets fue diseñada intencionalmente para mapear directamente a objetos estándar de SAP PM:

- Campo "Equipo" → Objeto SAP: Equipment Master Record (Código funcional asignado)
- Campo "Tipo\_Intervencion" → Objeto SAP: Order type (PM01 = correctivo, PM02 = preventivo, PM03 = Predictivo)
- Campo "Especialidad" → Objeto SAP: Work Center (Centro de trabajo por especialidad)
- Campo "Estado" → Objeto SAP: System Status (CRTD = creado, REL = Liberado, TECO = técnicamente completo)
- Campo "Observaciones" → Objeto SAP: Long Text en orden de mantenimiento

Esta correspondencia una a uno entre las variables que al momento del registro de las intervenciones o al momento de asignar credenciales para algún equipo o repuesto, finalmente facilitando la migración evitando tener que volver a ingresar a sistema los datos que identifican al activo o las intervenciones.

#### 2. maestro de equipos pre estructurado:

La lista de 37 equipos utilizada en campo "Equipo" debe mantenerse sincronizada con el futuro maestro de equipos SAP. Para facilitar migración, se recomienda:

- Asignar desde el primer momento códigos funcionales a equipos siguiendo estándar corporativo CMPC
- Documentar jerarquía funcional de equipos para replicar en SAP como estructura de ubicación técnica
- Registrar datos técnicos clave: fabricante, modelo, año instalación, número de serie, que serán campos obligatorios en Equipment Master de SAP

#### 3. Codificación de tareas preventivas:

Los planes de mantenimiento preventivo deben codificarse siguiendo nomenclatura que será replicada en SAP como Task Lists:

- ID de tarea: "MW-P01", "PBA-P03", etc. → serán Plan Group + Counter en SAP
- Frecuencia: "Quincenal", "Mensual", "2,500 hrs" → se campean a Scheduling Indicator en SAP

Esta codificación anticipada evita retrabajo de documentación al migrar.

### Beneficios esperados de SAP PM

La migración a SAP PM proporcionará capacidades ampliamente superiores respecto al sistema Google Sheets actual:

- Gestión de ordenes de trabajo: Workflow completo desde solicitud → planificación → ejecución → cierre, con notificaciones automáticas y control de avance
- Gestión de inventario integrada: Consumo de repuestos se descuenta automáticamente de inventario al cerrar orden, elimina registro manual dual
- Programación automática de preventivos: El sistema genera automáticamente ordenes de mantenimiento preventivo según frecuencias definidas en Task Lists, elimina planificación manual mensual
- Reportes estándar: Dashboard preconfigurados con KPIs estándar de industria, reducen esfuerzo de generación manual de indicadores
- Integración con modulo financiero: Costos de mantenimiento (repuestos + mano de obra + servicios) se contabilizan automáticamente, facilitando análisis de costo total de propiedad (TCO) por equipo
- APP móvil: Técnicos pueden registrar intervenciones desde Tablet o smartphone directamente en terreno, elimina realizar repetidas veces el trabajo de transcripción.

El modelo de gestión propuesto en este capítulo ha sido diseñado intencionalmente para ser independiente a la plataforma tecnológica, asegurando que la inversión en diseño de procedimiento, definición de KPIs y estructuración de planes de mantenimiento mantiene su valor independiente de cambios tecnológicos futuros.