



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**DESARROLLO DE ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO PARA LA
GESTIÓN DE EQUIPOS CRÍTICOS A TRAVÉS DE ANÁLISIS DE
CONFIABILIDAD EN LA EMPRESA CMPC PULP PLANTA SANTA FE**

POR

Joaquín Francisco Fuentealba Cisternas

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:
Dr. Ing. Cristian Canales Cárdenas
Mg. Ing. Félix Arcaya Chirinos

Julio 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Joaquín Francisco Fuentealba Cisternas

© 2025 Joaquín Francisco Fuentealba Cisternas

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

Agradezco a mis Padres, hermanos, pareja y amigos por su apoyo incondicional y consejos brindados. En especial a mi profesor guía y mi supervisor en Planta Santa Fe por su preocupación y constante motivación para la realización de esta memoria.

Esta memoria está dedicada a Maximiliano René Henning Ortega, amigo que formó parte de mi familia, siendo un pilar fundamental y una constante motivación en mi vida universitaria, que, al día de hoy, me acompaña desde el cielo.

Resumen

La presente memoria de título tiene como objetivo desarrollar una metodología estructurada que permita definir estrategias de mantenimiento para equipos críticos A de Planta Santa Fe que actualmente no cuentan con una estrategia asociada. El trabajo comprende la consideración de impacto económico y productivo, herramientas basadas en análisis de confiabilidad y validación mediante metodología FMECA, acorde tanto a normativa nacional, internacional y estándares internos de planta.

Inicialmente, se verifica el análisis de criticidad realizado por la UC&GA de planta, seleccionando equipos de alta criticidad (A) que no presenten plan de mantenimiento asociado. Posteriormente, se analizan las estrategias y directrices de mantenimiento presentes actualmente, detectando brechas y oportunidades de mejora.

Con el fin de caracterizar el historial de falla de los equipos seleccionados, se aplica el modelo de Weibull, el cual responde con parámetros como: confiabilidad, tasa de falla, MTBF, MTTR, β y η , lo que permite visualizar y caracterizar las fallas de cada activo. Además, con el fin de priorizar activos de manera más técnica se consideran análisis de Pareto y Jack Knife.

De esta manera, se seleccionan equipos representativos para Planta Santa Fe los cuales son analizados mediante FMECA, lo que permite identificar modo de falla, causa, efecto, severidad, detectabilidad, impacto, entre otros, definiendo así estrategias de mantenimiento basadas en la metodología RCM.

Finalmente, se estimaron indicadores clave de desempeño, tales como disponibilidad operativa y tasa de falla, así como también se propuso que, una vez evaluada la metodología por parte de planta, se estimaran la confiabilidad y disponibilidad de los activos en cuestión, lo que permite evaluar la efectividad de la metodología desarrollada.

En base a lo anterior, la memoria de título concluye que es posible caracterizar detalladamente el comportamiento de falla por equipo, lo que conlleva directamente a priorizar activos de manera estratégica y definir estrategias de mantenimiento efectivas, lo cual contribuye no tan sólo a una toma de decisiones alineada con lineamientos internos, sino también con la gestión de activos.

Palabras clave: RCM, criticidad, Weibull, FMECA, confiabilidad.

Abstract

This thesis aims to develop a structured methodology for defining maintenance strategies for critical A equipment at the Santa Fe Plant, which currently lack an associated maintenance plan. The work includes economic and production impact assessments, the use of reliability-based analysis tools, and validation through the FMECA methodology, all in accordance with national and international standards, as well as the plant's internal guidelines.

The process begins by reviewing the criticality analysis conducted by the plant's UC&GA team, identifying high criticality (A) equipment without an existing maintenance strategy. The current maintenance strategies and guidelines are then analyzed to identify gaps and opportunities for improvement.

To better understand the failure history of the selected equipment, the Weibull model is applied. This model provides key parameters such as reliability, failure rate, MTBF, MTTR, β , and η , allowing for a clear characterization of each asset's failure behavior. Additionally, Pareto and Jackknife analyses are used to technically prioritize the assets.

Representative equipment for the Santa Fe Plant is then selected and analyzed using FMECA. This allows for the identification of failure modes, causes, effects, severity, detectability, impact, and more ultimately enabling the development of maintenance strategies based on the RCM methodology.

Finally, key performance indicators such as operational availability and failure rate are estimated. The methodology proposes that, once reviewed by plant personnel, reliability and availability metrics be calculated for the selected assets to assess the effectiveness of the developed approach.

In conclusion, this thesis demonstrates that it is possible to accurately characterize failure behavior at the equipment level. This enables the strategic prioritization of assets and the definition of effective maintenance strategies, contributing not only to decision making aligned with internal guidelines but also to broader asset management efforts.

Keywords: RCM, criticality, Weibull, FMECA, reliability.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	iii
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vi
Glosario	vii
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Identificación y cuantificación del problema	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Hipótesis del problema	2
1.4 Alcance	2
1.5 Metodología.....	3
1.6 Plan de trabajo	4
2 CAPÍTULO 2: Marco Teórico	5
2.1 Normativa aplicable.....	5
2.2 Evaluación de criticidad de activos	6
2.3 Estrategias de mantenimiento y enfoque RCM	7
2.4 Herramientas de análisis de confiabilidad	8
2.5 Curva P-F.....	10
2.6 Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (FMECA).....	11
3 CAPÍTULO 3: Estado del Arte	12
4 CAPÍTULO 4: Desarrollo del proyecto	16
4.1 Verificación de análisis de criticidad de activos y selección equipos de criticidad A sin estrategia de mantención definida.	16
4.2 Análisis y caracterización de las estrategias de mantenimiento basadas en el entorno operacional actual de Planta Santa Fe.	21
4.3 Priorización de activos físicos basada en la metodología de análisis de confiabilidad, costos e impacto productivo.	27
5 CAPÍTULO 5: Resultados	46
6 CAPÍTULO 6: Conclusiones	47
Trabajos Futuros	47
Referencias	48
Anexo A: Análisis estadístico mediante Jack Knife	50
Anexo B: Frecuencia óptima de plan de mantenimiento y oportunidad CMPC.....	57

Anexo C: Componente, modo de falla y motivo con mayor repetitividad por equipo y sus costos de mantención asociados por falla	64
Anexo D: Análisis FMECA colector 1	74
Anexo E: Análisis FMECA reductor 4	74
Anexo F: Análisis FMECA bomba 105	74
Anexo G: Análisis FMECA estanque 1	74

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Estrategias de mantenimiento actuales	7
Tabla 2.2: Metodología RCM	8
Tabla 4.1: Aspectos de evaluación de consecuencias	18
Tabla 4.2: Resultados de evaluación de criticidad por ubicaciones técnicas	20
Tabla 4.3: Cuenta de equipos críticos A sin estrategia de mantenimiento definida.....	20
Tabla 4.4: Enfoque y objetivo de estrategias según criticidad de activos.....	22
Tabla 4.5: Política de mantención de estrategias según criticidad de activos.....	23
Tabla 4.6: Política de inversión y de repuestos y servicios de estrategias según criticidad de activos	24
Tabla 4.7: Servicio de mantenimiento de estrategias según criticidad de activos	24
Tabla 4.8: Ingeniería de mantención de estrategias según criticidad de activos.....	25
Tabla 4.9: Criterio y oportunidad de intervención de tipos de mantenimiento actuales en planta	26
Tabla 4.10: Brechas de cobertura y oportunidades de mejora según criticidad de activos.....	27
Tabla 4.11: Distribución Weibull con métricas consideradas para equipos en estudio	28
Tabla 4.12: Costos asociados por equipo	37
Tabla 4.13: Malos actores por pérdidas de producción para cada línea.....	40
Tabla 4.14: Cantidad de equipos por cuadrante en análisis Jack Knife	41
Tabla 4.15: Costos por cuadrante acorde a análisis Jack Knife	41
Tabla 4.16: Priorización de análisis de Pareto por Familia.....	42
Tabla 4.17: Priorización de análisis de Pareto por Equipo con $\lambda \geq 2$	42
Tabla 4.18: Priorización de análisis de Jack Knife sobre indisponibilidad.....	43
Tabla 4.19: Resumen de priorización de posibles equipos para análisis FMECA.....	43
Tabla 5.1: Estimaciones de KPI para validación.....	46

Lista de Figuras

Figura 2.1: Matriz de criticidad Planta Santa Fe.....	7
Figura 2.2: Diagrama de Pareto ejemplar. [11].....	9
Figura 2.3: Diagrama de Jack Knife ejemplar. [11].....	9
Figura 2.4: Curva P-F. [5].....	11
Figura 4.1: Diagrama SIPOC procedimiento de criticidad de activos	16
Figura 4.2: Matriz RASCI procedimiento de análisis de criticidad	17
Figura 4.3: Diagrama de flujo de evaluación de criticidad	19
Figura 4.4: Equipos criticidad A área mecánica sin estrategia de mantención definida	21
Figura 4.5: Análisis de Pareto por familia de equipos	35
Figura 4.6: Análisis de Pareto por equipo para $\lambda \geq 2$	36
Figura 4.7: Análisis de Jack Knife para equipos en estudio.....	36
Figura 4.8: Confiabilidad $R(t)$ de equipos seleccionados para análisis FMECA.....	44
Figura 4.9: Tasa de Falla $\lambda(t)$ de equipos seleccionados para análisis FMECA	44
Figura 4.10: Probabilidad Acumulada de Falla $F(t)$ de equipos seleccionados para análisis FMECA	45
Figura 4.11: Densidad de Probabilidad de Falla $f(t)$ de equipos seleccionados para análisis FMECA	45

Glosario

Adt	:	Toneladas
D	:	Probabilidad de detección
ES	:	En Servicio
EPS	:	Empresa Prestadora de Servicios
FMECA	:	Failure Modes, Effects and Criticality Analysis
H_m	:	Horas de mantenimiento correctivo y preventivo planificado
H_{mc}	:	Horas de mantenimiento correctivo por detención imprevista
H_p	:	Horas período de evaluación
KPI	:	Key Performance Indicator
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
PGP	:	Parada General de Planta
PNP	:	Parada No Planificada
PP	:	Parada Planificada
RASCI	:	Responsible, Accountable, Support, Consulted, Informed
RCM	:	Reliability Centered Maintenance
RPN	:	Risk Priority Number
SIPOC	:	Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers
S	:	Severidad del efecto
t	:	Tiempo
t_i	:	Tiempos hasta la falla
T	:	Tiempo total de operación
T_r	:	Tiempo total de reparación
UC&GA	:	Unidad de Confiabilidad y Gestión de Activos

Símbolos

λ	:	Tasa de falla
%	:	Porcentaje

Letras griegas

β	:	Parámetro de forma de distribución
η	:	Tiempo característico de falla

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Identificación y cuantificación del problema

En la industria de la celulosa, la disponibilidad y confiabilidad de los equipos críticos son factores determinantes para la eficiencia operativa y la optimización de costos. En CMPC Pulp SpA, Planta Santa Fe, la gestión del mantenimiento enfrenta el desafío de reducir fallas imprevistas que impactan negativamente la producción y, por otro lado, maximizar la vida útil de los activos.

Para ello, es fundamental implementar metodologías estructuradas de gestión de los recursos necesarios para detectar a tiempo los síntomas que permiten planificar análisis de fallas para así identificar y mitigar los modos de falla más recurrentes, alineando la estrategia de mantenimiento con los estándares internacionales y las necesidades operativas de la planta.

El mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) junto con el análisis de modos de falla, efectos y criticidad (FMECA), han demostrado ser soluciones efectivas para abordar estos desafíos, ya que permiten reducir el tiempo de inactividad de los equipos, optimizar su vida útil y minimizar los costos asociados a fallas imprevistas.

Desde el punto de vista tecnológico, [4] y [5] enfatizan que el desarrollo de estrategias de mantenimiento basadas en confiabilidad permite intervenciones más precisas en equipos críticos, reduciendo fallas inesperadas y aumentando la disponibilidad de estos. De la misma manera [7] refuerza la importancia del FMECA como una herramienta clave para la detección temprana de fallas potenciales y la optimización de la gestión del mantenimiento.

En el ámbito económico, [5] y [8] destacan como la metodología RCM en la industria reduce las intervenciones no programadas y optimiza tanto la vida útil de los equipos como los costos operativos. En tanto [9] evidencia que, mediante análisis Weibull, una reducción de fallas, y con ello la necesidad de mantenimiento correctivo, maximiza la rentabilidad de operaciones industriales.

Desde lo ambiental, el mantenimiento centrado en confiabilidad juega un papel fundamental, ya que, como mencionan [6] y [8], la correcta aplicación de estas metodologías reduce el impacto ambiental al prevenir derrames y con ello la contaminación de residuos industriales. En la misma línea, [4] y [5] destacan que estas prácticas son primordiales al momento de disminuir la huella de carbono y el control de emisiones, respectivamente.

Acorde a lo social, [5], [6], [8], entre otros, destacan que la implementación de estrategias basadas en confiabilidad minimiza la exposición del personal a condiciones de alto riesgo, lo que reduce accidentes laborales y garantiza un ambiente de trabajo seguro y eficiente. Además, [4] deja ver que la disminución de emergencias ante la falla de equipos críticos o paradas no programadas reduce la carga de trabajo y el estrés laboral, lo que conlleva una mejor calidad de vida para el personal.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología estructurada que permita evaluar y definir estrategias de mantenimiento en equipos críticos; basada en análisis de confiabilidad, modos de falla y metodología de evaluación de criticidad según las normas internacionales y estándares internos de Planta Santa Fe.

1.2.2 Objetivos específicos

OE1: Verificar el análisis de criticidad de activos según la confiabilidad de equipos [1], gestión de activos [2] y estándares de Planta Santa Fe, y seleccionar equipos de criticidad A sin estrategia de mantención definida.

OE2: Analizar y caracterizar las estrategias de mantenimiento basadas en el entorno operacional actual de Planta Santa Fe.

OE3: Definir estrategias de mantenimiento basadas en la metodología de análisis de confiabilidad, costos e impacto en producción, alineadas con la gestión de activos [2] y estándares de Planta Santa Fe.

OE4: Determinar frecuencias de mantenimiento a partir de indicadores de confiabilidad y validar la metodología propuesta mediante aplicación de FMECA para casos representativos.

OE5: Definir los indicadores clave de desempeño (KPI) para, a futuro, evaluar la metodología propuesta.

1.3 Hipótesis del problema

La aplicación de estrategias de mantenimiento definidas a partir de modos de falla, metodología RCM y análisis Weibull mejora significativamente la confiabilidad y disponibilidad de equipos críticos, ya que estos últimos al no presentar estrategias óptimas reflejan una mayor cantidad de fallas imprevistas y menor optimización de recursos, tal como lo respaldan [5], [6] y [8].

1.4 Alcance

La presente memoria de título presenta foco, única y exclusivamente, en los equipos críticos A de Planta Santa Fe que actualmente no cuentan con estrategia de mantenimiento definida. Además, si bien se considera un desarrollo estructurado que conlleva a definir estrategias, este se validará sólo para casos representativos en Planta Santa Fe.

Finalmente, dicha validación no contempla implementación ni evaluación de efectividad, ya que son aristas propias de Planta Santa Fe, dejando a su disposición tanto la investigación como los lineamientos definidos.

1.5 Metodología

OE1: Verificar el análisis de criticidad de activos según la confiabilidad de equipos [1], gestión de activos [2] y estándares de Planta Santa Fe, y seleccionar equipos de criticidad A sin estrategia de mantención definida.

En base al análisis de criticidad de activos proporcionado por Planta Santa Fe, confiabilidad de equipos [1] y estándares de planta, se verificará análisis implementado para determinar la criticidad de cada equipo de planta, es decir; metodología, matriz de criticidad y resultados generales. En base a lo anterior, se seleccionarán los equipos de criticidad A sin estrategia de mantención definida por Planta Santa Fe.

OE2: Analizar y caracterizar las estrategias de mantenimiento basadas en el entorno operacional actual de Planta Santa Fe.

Se realizará un levantamiento detallado de las estrategias de mantenimientos implementadas actualmente en equipos críticos A de planta, identificando correctamente los tipos de mantenimientos establecidos, fundamentos técnicos y resultados, detectando oportunidades de mejora y brechas en la cobertura de las estrategias de mantenimiento actuales, permitiendo establecer un punto de comparación con los resultados esperados en la presente investigación.

OE3: Definir estrategias de mantenimiento basadas en la metodología de análisis de confiabilidad, costos e impacto en producción, alineadas con la gestión de activos [2] y estándares de Planta Santa Fe.

En base a metodología RCM, análisis Weibull, costos e indicadores de impacto en producción, se determinarán las estrategias de mantenimiento más adecuadas para equipos críticos A seleccionados. Esto permitirá proponer medidas para mitigar posibles brechas existentes en las estrategias actuales, sustentadas en un enfoque técnico y basado en el riesgo operacional, medio ambiental y productivo actual, alineando las nuevas estrategias con la gestión de activos [2] y los estándares de planta.

OE4: Determinar frecuencias de mantenimiento a partir de indicadores de confiabilidad y validar la metodología propuesta mediante aplicación de FMECA para casos representativos.

A partir de lo realizado mediante análisis de Weibull, se establecerán métricas clave para la determinación de frecuencias óptimas de mantención como MTBF, MTTR y tasa de falla. Según

CAPÍTULO 2: Marco Teórico

El desarrollo de estrategias de mantenimiento basadas en confiabilidad requiere de una sólida comprensión normativa, técnica y metodológica que sustente la gestión de activos en entornos industriales.

En este contexto, el capítulo a continuación aborda los fundamentos teóricos que permiten sustentar y validar la formulación de una metodología estructurada con enfoque en equipos críticos A, considerando lineamientos internacionales, herramientas clave y técnicas de análisis de confiabilidad que permiten caracterizar el comportamiento de fallas y optimizar decisiones en función del riesgo, impacto y desempeño de los activos.

2.1 Normativa aplicable

2.1.1 International Organization for Standardization, ISO 14224: Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment, 3rd ed., ISO, 2016. [1]

Esta norma es un estándar internacional que establece directrices para la recopilación y organización estandarizada de datos de confiabilidad y mantenimiento en sectores industriales. Su principal objetivo es facilitar el intercambio de información y mejorar la gestión de activos a través de datos precisos y consistentes.

Respecto a su estructura y principios clave, establece un marco para la recopilación sistemática de datos, proporciona métodos para su análisis y define categorías para la clasificación de activos, lo que conlleva no sólo a una mejora en la gestión del mantenimiento y confiabilidad de los datos, sino que también contribuye a una cultura de mejora continua y sostenibilidad.

Además, esta norma no sólo proporciona una taxonomía estructurada para la descripción de fallas, sino también define métricas clave de desempeño, dentro de las cuales se encuentran:

Tiempo medio entre falla:

$$MTBF = \frac{T}{N_f} \quad (1)$$

Tiempo medio de reparación:

$$MTTR = \frac{T_r}{N_r} \quad (2)$$

Disponibilidad operativa:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3)$$

Tasa de falla:

$$\lambda = \frac{N_f}{T} \quad (4)$$

Así mismo, las métricas presentadas son ampliamente utilizadas en la literatura, tal como lo respalda [3] y [8], al utilizarlas como criterios cuantitativos al momento de evaluar la metodología empleada.

2.1.2 International Organization for Standardization, ISO 55001: Asset management — Management systems — Requirements, ISO, 2014. [2]

La presente norma es un estándar internacional que establece los requisitos necesarios para definir, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de activos físicos. Su propósito fundamental es proporcionar un sistema de gestión que permita que toda organización maximice el valor de sus activos, considerando factores técnicos, económicos y de riesgo en el ciclo de vida del activo.

De esta manera, establece que uno de los pilares fundamentales de la gestión de activos es la alineación de las estrategias de mantención con los objetivos organizacionales, así como el enfoque sistemático basado en la evaluación de riesgos.

Además, cabe destacar que su riguroso cumplimiento lleva consigo mejoras de rendimiento a nivel empresarial, reducción de costos, mitigación de riesgos, toma de decisiones informadas y mayor sostenibilidad.

Finalmente, una herramienta conceptual fundamental que proporciona esta norma es la pirámide de la confiabilidad, la cual representa los niveles jerárquicos dentro del mantenimiento y la gestión de activos. Está compuesta por 3 niveles que se interrelacionan de manera ascendente con el fin de maximizar la confiabilidad, disponibilidad y eficiencia de los activos a lo largo de su ciclo de vida:

- Nivel operativo: Se enfoca en la ejecución técnica del mantenimiento, donde ocurre la interacción directa con los activos. Incluye actividades como inspecciones, estrategias de mantención (predictiva, correctiva, entre otras), etc.
- Nivel táctico: Se encarga de la planificación y distribución de recursos, siendo la conexión entre la estrategia y la planificación. Incluye actividades como elaboración de planes de mantenimiento, programación de tareas, etc.
- Nivel estratégico: Define la dirección general y los objetivos del sistema de gestión de activos. Incluye actividades como establecer políticas, evaluar el desempeño del sistema, entre otros.

2.2 Evaluación de criticidad de activos

Para evaluar y clasificar un activo físico según su criticidad, es necesario considerar el impacto de la falla del activo en términos de: seguridad, medio ambiente, producción, calidad y costos.

Para ello, y con el fin de priorizar los activos físicos, es fundamental contar con matrices de criticidad y análisis cualitativos y cuantitativos que permitan seleccionar los activos críticos que requieren de una estrategia de mantención específica, como menciona [4]. Así mismo, se puede ver como [5] utiliza

este análisis y prioriza activos según su criticidad antes de aplicar la metodología RCM, en tanto [6] lo hace mediante el cálculo del RPN como parte de un análisis FMECA.

A continuación, la Figura 2.1 presenta la matriz de criticidad para clasificar y priorizar activos según su impacto en Planta Santa Fe, alineada con el estándar de criticidad [13]:

Frecuencia	5	5	10	25	35	125
	4	4	8	20	28	100
	3	3	6	15	21	75
	2	2	4	10	14	50
	1	1	2	5	7	25
Magnitud	1	2	5	7	25	
	1	2	3	4	5	
	Consecuencia					

Figura 2.1: Matriz de criticidad Planta Santa Fe.

2.3 Estrategias de mantenimiento y enfoque RCM

2.3.1 Tipos de mantenimiento

De acuerdo con lo estudiado por [8], la adecuada selección de una estrategia de mantención es fundamental para asegurar la disponibilidad, confiabilidad y eficiencia de los activos. Esto depende principalmente de la criticidad del activo, la probabilidad de falla, su costo y las consecuencias de la falla. A continuación, la Tabla 2.1 presenta las estrategias de mantenimiento existentes en la actualidad levemente descritas:

Tabla 2.1: Estrategias de mantenimiento actuales

Estrategia de mantenimiento	Descripción
Mantenimiento correctivo	Se realiza después de que ocurre la falla. La prioridad es restaurar la funcionalidad del activo.
Mantenimiento preventivo	Se realiza a intervalos regulares independiente de la condición del equipo.
Mantenimiento predictivo	Se basa en el monitoreo continuo de la condición del equipo para predecir fallas futuras.
Mantenimiento proactivo	Se enfoca en identificar y eliminar las causas raíz de las fallas.

2.3.2 Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM)

Tal como mencionan [5] y [8], la metodología RCM se basa en 7 preguntas fundamentales que guían el análisis de los activos, permitiendo identificar sus funciones, modos de falla, causas, efectos, consecuencias y posibles estrategias, lo que permite garantizar la confiabilidad y disponibilidad de los activos, optimizando costos y minimizando riesgos. A continuación, la Tabla 2.2 presenta las 7 preguntas base de la metodología RCM:

Tabla 2.2: Metodología RCM

Nº	Pregunta
1	¿Cuáles son las funciones que debe cumplir el activo y cuál es el desempeño esperado en su actual contexto operacional definido?
2	¿De qué manera puede fallar completa o parcialmente el activo al cumplir con su desempeño?
3	¿Cuál es la causa origen del fallo funcional?
4	¿Qué sucede cuando ocurre un fallo funcional?
5	¿Cuál es la consecuencia de cada fallo funcional?
6	¿Qué se puede hacer para prevenir o predecir la ocurrencia de cada fallo funcional?
7	¿Qué se puede hacer si no es posible prevenir o predecir la ocurrencia del fallo funcional?

De esta manera, [4] asegura que el RCM permite pasar de una gestión reactiva a una basada en el riesgo y el análisis funcional, lo cual es fundamental para definir estrategias de mantención sostenibles.

2.4 Herramientas de análisis de confiabilidad

2.4.1 Diagrama de Pareto

El análisis de Pareto es una herramienta utilizada para priorizar causas o modos de falla según su frecuencia o impacto productivo. Dicho análisis, establece que aproximadamente el 80% de las fallas provienen del 20% de las causas [12].

Para su correcta ejecución, es fundamental recopilar y clasificar los datos a analizar en categorías, para posteriormente calcular las frecuencias por cada categoría. Así, el diagrama de Pareto deja ver, de manera descendente, la relación de cantidad de ocurrencias v/s categorías definidas.

Tal como demuestra [11], mediante este análisis es posible identificar el número de fallas que generan la mayor cantidad de paradas o pérdidas económicas, lo que contribuye a priorizar activos y, por tanto, tareas de mantenimiento. A continuación, y a modo de ejemplo, la Figura 2.2 presenta un diagrama de Pareto típico en la industria:

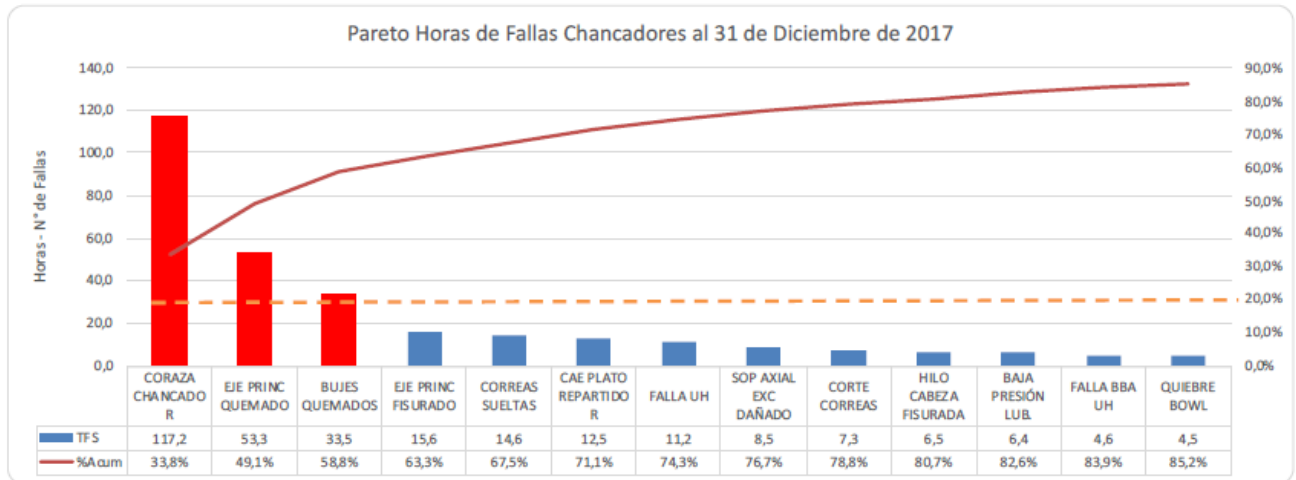


Figura 2.2: Diagrama de Pareto ejemplar. [11]

2.4.2 Método de Jack Knife

El método de Jack Knife es una técnica estadística utilizada para estimar la sensibilidad de los parámetros calculados, ayudando a depurar datos e identificar valores influyentes. En el ámbito de la confiabilidad, permite una mejor comprensión de los datos de falla y ayuda a priorizar las acciones de mantenimiento, siendo fundamental para validar la robustez de modelos como el análisis Weibull [12].

Respecto de la priorización de acciones de mantenimiento, es importante destacar que, una vez se analicen y trabajen los datos de falla para ser visualizados, se presenta una gráfica que relaciona tiempo (agudo) v/s frecuencia (crónico), dividida en 4 cuadrantes por los promedios de cada una de las variables, esto con el fin de esclarecer las fallas agudas y crónicas, es decir, los activos que vale la pena priorizar.

Según deja ver [10], su uso es sumamente útil, ya que mejora la precisión del análisis de confiabilidad y permite fundamentar mejor la toma de decisiones en cuanto a costos y fallas crónicas. A continuación, la Figura 2.3 presenta un diagrama de Jack Knife común en la industria.

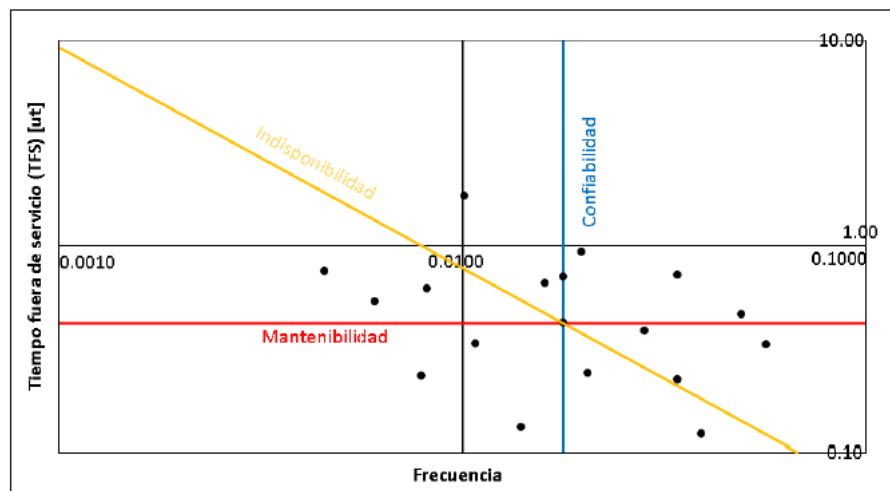


Figura 2.3: Diagrama de Jack Knife ejemplar. [11]

2.4.3 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull permite modelar el comportamiento de las fallas en el tiempo, determinando si estas se producen por causas aleatorias, fallas tempranas o por desgaste [12].

La función de confiabilidad está dada por:

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

Donde:

- $\beta < 1$: Fallas tempranas
- $\beta = 1$: Fallas aleatorias
- $\beta > 1$: Fallas por desgaste

Para utilizar correctamente esta distribución, es necesario una recopilación de datos hasta la falla, estimar parámetros de escala (η) y forma (β) mediante MLE, analizar la forma de la distribución (β) y, gracias a (5), tomar decisiones respecto del diseño, operación y/o mantenimiento del sistema en estudio.

Acorde a lo estudiado por [9], Weibull es fundamental para identificar tendencias en los datos de fallas y tomar decisiones de manera informada y con sustento.

2.4.4 Método de máxima verosimilitud (MLE)

Este método busca encontrar los parámetros de una distribución, en este caso Weibull, que maximice la probabilidad de que los datos analizados hayan ocurrido, es decir, encuentra los parámetros más probables del modelo de datos de precisa.

Para su correcta aplicación en Weibull, es necesario contar con un conjunto de datos de tiempos hasta la falla que pueden ser modelados bajo la función logarítmica de verosimilitud presentada a continuación:

$$\ln L(\beta, \eta) = n \ln \beta - n\beta \ln \eta + (\beta - 1) \sum_{i=1}^n \ln t_i - \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i}{\eta}\right)^\beta \quad (6)$$

Finalmente, con la ayuda de softwares como R, Python, Matlab o Minitab es posible maximizar la función respecto a β y η , ya que la función por sí sola no tiene una solución cerrada simple.

2.5 Curva P-F

La curva P-F es una herramienta conceptual muy utilizada en la gestión del mantenimiento para representar el tiempo que transcurre entre la aparición de una falla potencial (P) y la ocurrencia de una falla funcional (F). De esta manera, dicha curva se utiliza para comprender y anticipar el deterioro progresivo de un activo, permitiendo planificar estrategias de mantención que eviten paradas no planificadas. A continuación, la Figura 2.4 presenta dicha curva:

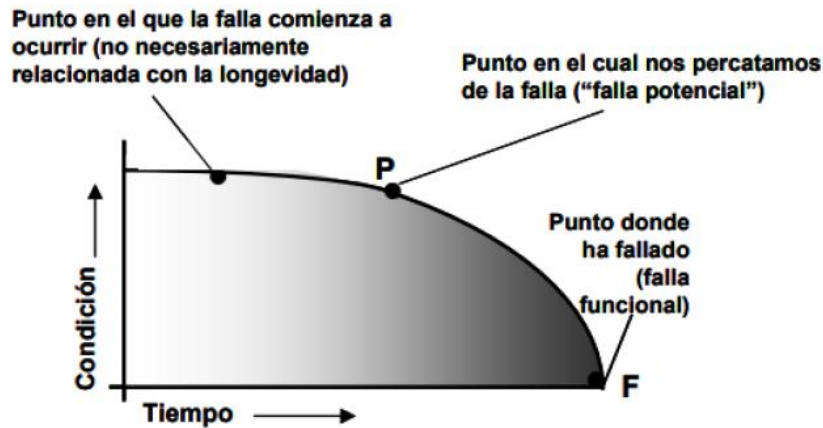


Figura 2.4: Curva P-F. [5]

Tal como lo estudia [5], esta curva describe 3 momentos clave en el comportamiento de un activo:

- **Falla potencial (P):** Es el punto donde la falla puede detectarse, aún si el equipo está operando.
- **Falla funcional (F):** Es el punto donde el equipo ya no cumple su función y provoca pérdidas.
- **Intervalo P-F:** Es el tiempo en el cual se puede intervenir el equipo sin llegar a la falla total.

La lógica de esta curva permite sustentar la necesidad de anticipar la falla en equipos críticos, reforzando tanto la validez de estrategias preventivas o predictivas, como la importancia de caracterizar los síntomas de fallas, permitiendo diseñar planes de intervención que anticipen la llegada del activo al punto F.

De esta manera, gracias a [4], se observa como el análisis de síntomas mediante confiabilidad permitió planificar estrategias preventivas para anticipar fallas funcionales reiteradas.

2.6 Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (FMECA)

FMECA es una herramienta utilizada para identificar, evaluar, y priorizar los modos de falla de un equipo, componente o sistema, junto con su efecto y criticidad. Tiene como objetivo analizar los defectos de las fallas en los activos y con ello mejorar la confiabilidad y seguridad de estos mismos, apoyando decisiones de mantenimiento y mitigando riesgos.

De esta manera, dentro de sus componentes clave se encuentran:

- **Modo de falla:** Forma específica en la que un componente puede fallar.
- **Efecto:** Consecuencia del modo de falla nivel de sistema o subsistema.
- **Causa:** Razón técnica por la cual ocurre la falla.
- **Criticidad:** Grado de riesgo cualitativo o cuantitativo asociado a la falla.

Finalmente, evalúa riesgos mediante el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (RPN), tal como muestra (7).

$$NPR = S \times O \times D \quad (7)$$

Donde cuánto mayor es el RPN, mayor es la prioridad de la acción correctiva.

CAPÍTULO 3: Estado del Arte

El presente capítulo permite contextualizar la relevancia y vigencia del presente estudio mediante la revisión de literaturas y aplicaciones previas que han abordado la gestión del mantenimiento desde la perspectiva de la confiabilidad.

A continuación, se recopilan antecedentes bibliográficos y estudios recientes que sustentan tanto el uso de normativa internacional como la implementación de metodologías RCM y el uso de herramientas cuantitativas como Weibull, FMECA, Pareto y Jack Knife, proporcionando una base sólida para identificar brechas y validar enfoques metodológicos aplicados en entornos industriales como el de Planta Santa Fe.

- **L. F. Hincapié Pérez, “Metodología de gestión de mantenimiento desde una perspectiva de Confiabilidad-Disponibilidad-Mantenibilidad (CDM) para aplicación en equipos de Tecnología de la Información (TI),” Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2014. [3]**

Esta investigación presenta un enfoque integrado sobre la gestión de la mantención basada en la perspectiva CDM, generalmente aplicada a entornos industriales, pero adaptada al sector tecnológico. Su principal aporte al estado del arte radica en determinar indicadores de confiabilidad cuantificables, tales como: MTBF, MTTR y disponibilidad, como criterios indispensables para definir políticas de mantenimiento.

Además, destaca como dicha metodología no sólo aporta en la digitalización de la información de fallas para retroalimentar procesos de toma de decisiones, sino también en lo potencialmente adaptable que puede resultar en industrias con necesidad de continuidad operativa.

- **O. E. Gordillo Santana y O. A. Sierra Arévalo, “Propuesta de mejora al plan de mantenimiento para los equipos de mayor criticidad en la empresa OSG aplicando la metodología RCM,” Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, 2016. [4]**

El presente estudio tiene como foco central la implementación de la metodología RCM como una herramienta para rediseñar planes de mantenimiento en función de la criticidad de los equipos. De esta manera, destaca la importancia de realizar un análisis de modos de fallas para justificar las distintas tareas de mantenimiento, reduciendo tiempos y focalizando recursos.

Del punto de vista de la gestión de la mantención basada en confiabilidad, el estudio de Gordillo y Sierra es sumamente relevante, pues documenta el proceso paso a paso, desde la evaluación de criticidad de los activos hasta la validación del plan de mejora, lo que lo convierte en una referencia clave para el desarrollo de pautas metodológicas semejantes en otras industrias.

- **L. G. Flores Puma, “Diseñar e implementar un plan de mantenimiento basado en RCM mantenimiento centrado en confiabilidad para equipos críticos en una cementera del sur del país,” Tesis de ingeniería, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Perú, 2019. [5]**

El estudio de Flores Puma es sumamente completo y relevante en cuanto a la aplicación real y medible de la metodología RCM en la industria pesada, pues demuestra como la correcta selección de funciones, modos de falla y consecuencias permite redefinir estrategias de mantenimiento desde un punto de vista costo-beneficio.

De esta manera, establece una comparación de indicadores como confiabilidad y costo de mantenimiento de equipos críticos entre el antes y después, lo cual deja ver como la metodología RCM, acompañada de criterios económicos, conllevan mejoras sustanciales tanto en la gestión del mantenimiento como en la toma de decisiones.

- **O. Cordero y E. Estupiñán, “Propuesta de optimización del mantenimiento de planta minera de cobre Ministro Hales, mediante análisis de confiabilidad, utilizando la metodología FMECA,” Tesis de maestría, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, 2021. [6]**

El presente estudio destaca por aplicar la metodología FMECA, con el apoyo de herramientas matemáticas y estadísticas, como herramienta principal de análisis de confiabilidad en una planta minera de cobre, donde a través de la identificación de modos de falla, evaluación de consecuencias, cálculo del número de prioridad de riesgo (RPN), probabilidad de falla y confiabilidad, se priorizan los activos y se reorganizan las tareas de mantenimiento, reduciendo así los costos asociados a paradas fuera de programa.

Además, cabe destacar que, por el hecho de priorizar una aproximación cualitativa basada en riesgo, su modelo es altamente relevante y aplicable en industrias intensivas en la gestión de activos, especialmente en la identificación de equipos críticos.

- **M. R. Poma Blanco y L. T. Jorquera Ochoa, “Manual didáctico para uso y aplicación de la metodología FMECA, en programas de mantenimiento centrados en confiabilidad,” Tesis de ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Chile, 2020. [7]**

Este documento, aunque con un enfoque más académico y formativo, deja ver la aplicación del análisis FMECA, junto con técnicas de jerarquización, como una herramienta base del mantenimiento centrado en confiabilidad, siendo imprescindible su claridad metodológica, la cual aporta lineamientos fundamentales para la identificación, análisis y evaluación de modos de falla en equipos críticos.

No obstante, si bien no es una metodología validada directamente en entornos industriales, su utilidad al momento de estructurar conocimiento técnico deja ver su versatilidad, y con ello la posibilidad, de aportar como base formativa en industrias reales y convertirse en una herramienta fundamental a la hora de construir estrategias de mantenimiento basadas en confiabilidad más robustas.

- **F. G. De la Cruz Tornero y P. H. Arata Panduro, “Mantenimiento centrado en la confiabilidad para incrementar la disponibilidad en equipos críticos en una planta de producción de harina y aceite de pescado - Callao - 2021,” Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú, 2021. [8]**

La presente investigación destaca por aplicar la metodología RCM directamente en una planta de proceso continuo con la finalidad de aumentar la disponibilidad de equipos críticos, vinculando como dicha metodología implica cambios importantes a nivel de producción y costos operativos. Para ello incorpora indicadores clave, como MTBF y MTTR, con el fin de evaluar las estrategias propuestas, lo que la hace especialmente relevante y aplicable en industrias donde el tiempo de inactividad tiene consecuencias críticas.

De este modo, lo estudiado por Arata y compañía refuerza la necesidad de vincular la confiabilidad técnica con los resultados económicos para justificar la implementación de mejoras en mantenimiento y optimizar la disponibilidad de los equipos, especialmente en plantas de procesos continuos con alto flujo de activos.

- **J. D. Carmona Londoño, “Análisis de confiabilidad mediante el modelo de Weibull,” Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2023. [9]**

Este estudio profundiza en el análisis de confiabilidad a través del modelo de Weibull con la finalidad de caracterizar el comportamiento de fallas en componentes críticos, permitiendo calcular la vida media de Weibull y con ello las frecuencias óptimas de mantención, facilitando así la toma de decisiones respecto a la planificación del mantenimiento, reduciendo costos ligados a paradas no programadas y extendiendo la vida útil de los activos.

De esta manera, el uso del modelo de Weibull propone una estructura metodológica replicable para recolectar y analizar datos históricos, permitiendo maximizar la disponibilidad e identificar si se presentan fallas tempranas, aleatorias o por desgaste, y con ello justificar estrategias de mantenimiento a partir de evidencia estadística.

- **J. D. Aulestia Espinosa y A. F. Guerrero Romero, “Desarrollo de una herramienta informática basada en el método Jack-Knife para el análisis de fallas y costos en flotas de transporte,” Tesis de grado, Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2022. [10]**

La presente investigación propone una herramienta informática desarrollada con el propósito de aplicar el método de Jack Knife, el cual permite determinar, bajo múltiples criterios, las prioridades del mantenimiento a partir de indicadores de confiabilidad. Si bien el estudio aplica sobre flotas de transporte, su metodología es transferible a contextos industriales donde se requiera identificar los elementos con mayor repercusión en costos de mantención o en la disponibilidad general del sistema.

Además, el método de Jack Knife ayuda a validar la estabilidad y robustez de estimaciones, siendo fundamental en la evaluación de sensibilidad, lo que lo convierte en un modelo sumamente útil al momento de la toma de decisiones bajo incertidumbre.

- **F. A. Cabrera Vásquez, “Desarrollo de una estrategia de confiabilidad en planta chancado División Gabriela Mistral – Codelco Chile,” Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Dirección de Empresas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2019. [11]**

El estudio realizado por Cabrera Vásquez presenta un enfoque metodológico basado en confiabilidad y estandarización de procesos que combina distintas herramientas, destacando el uso de análisis de Pareto y Jack Knife como técnica primordial para la identificación de fallas críticas en equipos de una planta de chancado. De esta manera, es posible concentrar los esfuerzos de mantención en los equipos que generan el mayor número de incidencias en producción.

Además, desde la perspectiva de la confiabilidad, tanto el análisis de Pareto como de Jack Knife no sólo contribuyen a cuantificar, de manera objetiva, los modos de falla más representativos, sino también a priorizar estrategias de mantenimiento que maximicen la disponibilidad de los equipos y, por ende, de los activos.

CAPÍTULO 4: Desarrollo del proyecto

4.1 Verificación de análisis de criticidad de activos y selección equipos de criticidad A sin estrategia de mantenimiento definida.

Un correcto análisis de criticidad posibilita la clasificación jerárquica de procesos, sistemas y/o equipos, en función de su nivel de criticidad, directamente relacionado con el riesgo que representan, lo cual facilita la toma de decisiones estratégicas priorizando las áreas de mayor impacto en el negocio.

Dentro de los niveles de criticidad establecidos en Planta Santa Fe, se encuentran:

1. **Criticidad Supercrítica (A+):** Son activos que pueden generar eventos con consecuencias de explosiones o incendios y que impliquen un riesgo material catastrófico.
2. **Criticidad Alta (A):** Son activos con frecuencia de falla alta y consecuencias moderadas, o frecuencia de falla baja y consecuencias altas.
3. **Criticidad Media (B):** Son activos con frecuencia de falla y consecuencias moderadas.
4. **Criticidad Baja (C):** Son activos con una alta frecuencia de falla, pero con bajas consecuencias, o bien bajas frecuencias de fallas acompañado de consecuencias moderadas.

4.1.1 Procedimiento de análisis de criticidad empleado

Este procedimiento tiene por objetivo establecer un método sistemático y documentado para la clasificación de activos en función de su criticidad, permitiendo: priorizar las actividades de mantenimiento y reparación, optimizar la asignación de recursos, mejorar la toma de decisiones relacionadas con la gestión de activos y reducir el riesgo de fallas y sus consecuencias.

Con el fin de esclarecer completamente el proceso y sus responsables, se utilizó el diagrama SIPOC y la matriz RASCI, presentados en las Figuras 4.1 y 4.2, respectivamente.

Proveedores (Suppliers)	Entradas (Inputs)	Proceso (Process)	Salidas (Outputs)	Clientes (Customers)
Subgerente de Mantenimiento	Procedimiento Análisis de Criticidad Plantas Pulp	Definición de criterios de criticidad		Gerencia Corporativa de Riesgos
Jefe de Unidad Confiabilidad		Recopilación de información sobre activos	Matriz de criticidad de activos	Gerencia Gestión de Activos
Jefe de Unidad Planificación	Portafolio de activos	Evaluación de la criticidad de cada activo	Informe de análisis de criticidad	Gerencias de Planta
Planificador de Mantenimiento	Historial de fallas y mantenimiento	Clasificación de activos en categorías (A+, A, B, C)	Clasificación de activos por categorías	Jefe de Unidad Confiabilidad
Ingeniero de Confiabilidad	Diagramas de flujo de procesos	Documentación de resultados y clasificación de activos		Jefe de Unidad Planificación
	Planilla de análisis de criticidad	Comunicación de resultados a stakeholders		SG de Planeación de Materiales
				SG de Compras de Servicios

Figura 4.1: Diagrama SIPOC procedimiento de criticidad de activos

N° Tarea	Tareas / Descripción de Roles	Miembros del Proceso							
		Gerente Gestión de Activos	Gerente de Planta	Subgerente de Mantenimiento Planta	Jefe de Unidad Planificación	Jefe de Unidad Confiabilidad	Jefe de Unidad Mantenimiento/ Jefes de Área	Ingeniero de Confiabilidad	Planificador Mantenimiento
1	Metodología Por Utilizar: Definición de los criterios de criticidad	A	I	C	S	R	I	I	I
2	Elaboración del listado de equipos: Recopilación de información a través de listado de equipos	I	I	I	S	A	I	R	S
3	Evaluación y clasificación de la criticidad de los activos	I	I	C	S	A	C	R	S
4	Documentación y registro en sistema de gestión documental y SAP	I	I	I	C	A	I	R/S	R/S
5	Aprobación de resultados de criticidad	A	I	R	I	I	I	I	I

Figura 4.2: Matriz RASCI procedimiento de análisis de criticidad

Donde:

- R : Responsable de la ejecución
- A : Responsable del proceso en conjunto
- S : Apoyo al rol ejecutivo
- C : Quien debe ser consultado para la realización de la tarea
- I : Quien debe ser informado para la realización de la tarea

4.1.2 Metodología utilizada

Para identificar y evaluar correctamente la criticidad de equipos críticos, se emplea un modelo (propio de planta) de Matriz de Criticidad por Riesgo (MCR). Este modelo se basa en el concepto de riesgo, definido como la consecuencia de multiplicar la frecuencia de un fallo por la severidad de este, tal como indica (8).

$$MCR = Frecuencia \times Consecuencia \quad (8)$$

Donde:

- Frecuencia : Número de eventos o fallas que presenta el proceso, sistema o activo evaluado
- Consecuencia : Resultado de un evento incierto que impacta negativamente en la empresa, su estrategia u objetivo de negocio.

4.1.3 Elaboración de listado de equipos

Para cumplir satisfactoriamente este punto, fue necesario de los siguientes sub-puntos presentados a continuación:

1. **Identificación de equipos en planta:** Identificar equipos críticos conlleva un examen exhaustivo de los listados de equipos existentes y su estructura jerárquica, buscando validar posibles cambios en el contexto operacional y la incorporación de nuevos equipos o la baja de activos existentes.
2. **Recopilación de información para la evaluación de riesgos:** Identificar y describir los riesgos que obstaculizan el logro de los objetivos estratégicos, tácticos y operativos de planta requiere de información pertinente, apropiada y actualizada. Esto implica la recolección de información histórica de los activos, la cual es fundamental para determinar sus funciones, capacidades, límites, impactos y cualquier otro dato relevante para el análisis.
3. **Análisis de información histórica:** Para esto es fundamental contar con los registros de eventos de falla en planta, así como registros de impacto en producción, calidad, costos de mantenimiento, seguridad y salud ocupacional, medio ambiente y comunidades, aspectos legales y de cumplimiento, reputación y, por último, del tiempo afectado al proceso en caso de fallas.

4.1.4 Evaluación de consecuencias

La consecuencia de una falla se determina en función de la calificación obtenida en cada una de las dimensiones evaluadas: producción y calidad, seguridad y salud ocupacional y medio ambiente y comunidad, donde se identifica el indicador final como aquel que presenta el mayor valor entre todas las dimensiones evaluadas. A continuación, la Tabla 4.1 presenta el detalle de los aspectos de evaluación de consecuencia acorde a los criterios establecidos en Planta Santa Fe.

Tabla 4.1: Aspectos de evaluación de consecuencias

Aspecto	Detalle de evaluación
Producción y calidad	Evalúa la capacidad de producción y la calidad del producto que se deja de generar debido a una falla.
Seguridad y salud ocupacional	Evalúa las consecuencias de eventos no deseados que pudiesen ocasionar daños a personas o equipos en el momento de su ocurrencia.
Medio ambiente y comunidad	Evalúa las consecuencias de eventos no deseados que pudiesen ocasionar daños al medio ambiente y a la comunidad en caso de una falla en el equipo analizado.

Además, existen ciertas definiciones que impactan directamente en la asignación de criticidad, independiente de los factores del cálculo de riesgo mencionados anteriormente, dentro de los cuales se encuentran:

- **Legal y Compliance (LC):** Considera aquellos requerimientos legales que se deban cumplir y equipos indicados por las áreas de seguridad y medioambiente de Planta Santa Fe para considerar un equipo como crítico. Por ejemplo: [14], [15] y resoluciones legales. En consecuencia, estos últimos se clasifican automáticamente con criticidad A.

- **Asistencia Técnica Crítica (AT):** Considera equipos que requieren la intervención de empresas externas especializadas y que no cuentan con soporte permanente en planta, lo que los convierte en un riesgo potencial para la operación. En estos casos, se les asigna inmediatamente la criticidad A.
- **StandBy (SB):** Considera los equipos que cuentan con respaldo tipo "Stand by" (una configuración lógica funcional donde ambas unidades cumplen exactamente la misma función) se les asigna inmediatamente la criticidad B.

4.1.5 Evaluación de la frecuencia de falla

La frecuencia de falla es la tasa promedio a la que un componente o sistema falla durante un período de tiempo específico y se expresa como la cantidad de fallas por unidad de tiempo.

Al igual que para la consecuencia, la frecuencia de falla se evalúa acorde a los criterios establecidos en Planta Santa Fe.

De esta manera, en base a lo calculado en los apartados 4.1.4, 4.1.5 y mediante lo establecido en (8), es posible calcular la criticidad de cada uno de los activos en planta y construir la matriz de criticidad.

A continuación, y a modo de resumen, la Figura 4.3 presenta un diagrama de flujo que permite evaluar la criticidad de los activos de planta bajo todas las consideraciones antes descritas:

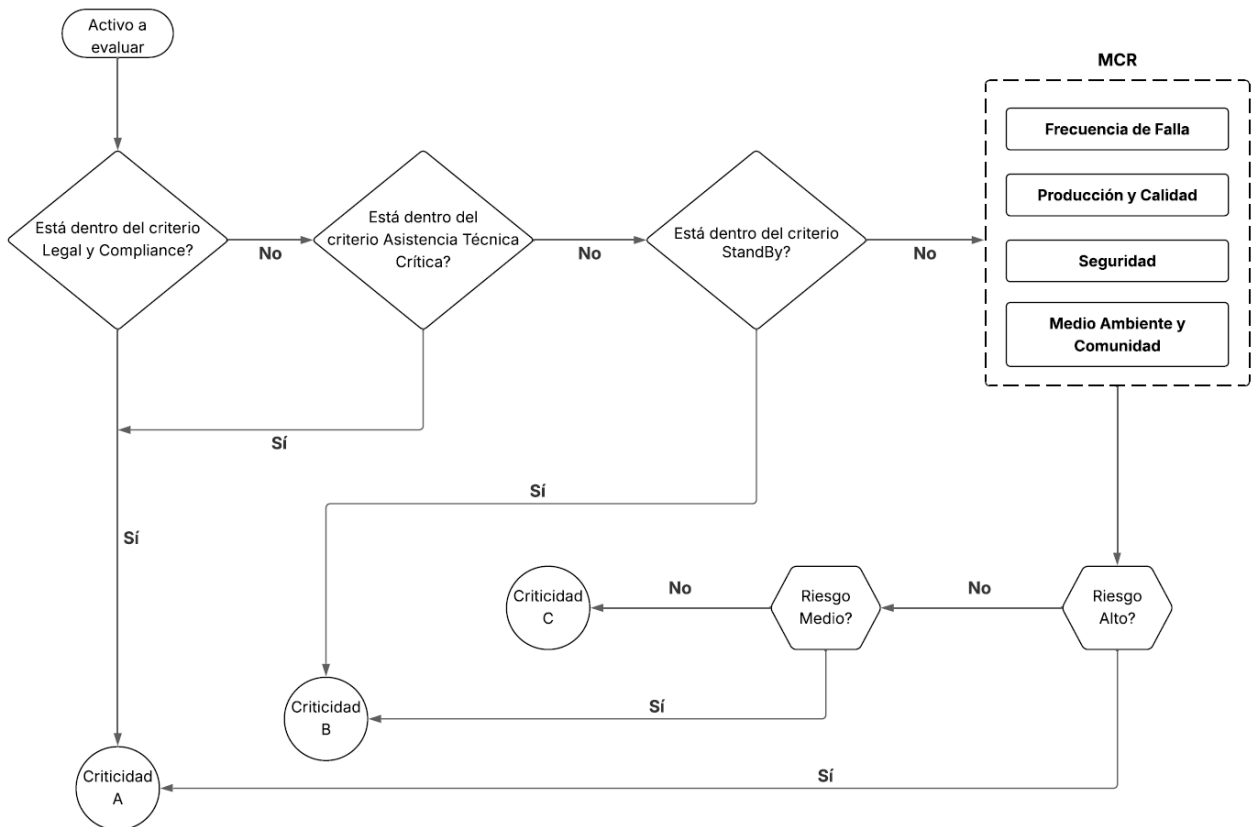


Figura 4.3: Diagrama de flujo de evaluación de criticidad

En términos de resultados, la Tabla 4.2 presenta la distribución porcentual de ubicaciones técnicas de los activos según su clasificación resultante del proceso de evaluación de criticidad:

Tabla 4.2: Resultados de evaluación de criticidad por ubicaciones técnicas

Criticidad	Porcentaje [%]
A	≈ 10%
B	≈ 25%
C	≈ 65%

A partir del análisis de criticidad realizado por la UC&GA de Planta Santa Fe, se destaca que, en términos de:

- **Confiabilidad de equipos [1]:** Se utiliza una estructura jerárquica de activos, amplia data histórica de mantenimiento, correcta categorización de modos de falla y prolijo cálculo de indicadores de confiabilidad.
- **Gestión de activos [2]:** Se efectúa una correcta evaluación de riesgo alineada con los objetivos organizacionales e integrada con la planificación del ciclo de vida de los activos.
- **Estándares internos de planta:** Se aplica una metodología a la altura, considerando variables específicas del entorno operativo y utilizando los resultados para priorizar tareas de mantenimiento estratégica y tácticamente.

Por tanto, se verifica que los criterios analizados y utilizados están en directa relación con los resultados obtenidos por el área.

De este modo, gracias a la correcta evaluación de criticidad, y a partir de una descarga del sistema de gestión de datos de Planta Santa Fe [16], fue posible seleccionar los equipos de criticidad A sin estrategia de mantención definida, tal como lo presenta la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Cuenta de equipos críticos A sin estrategia de mantenimiento definida

Área	Equipos sin estrategia definida
Electrocontrol	2341
Mecánica	860
Sin identificar	652
Climatización	6
Total	3859

A raíz del elevado número de equipos sin estrategia definida y prevaleciendo los objetivos establecidos en esta investigación, se establece el criterio de considerar sólo los equipos del área mecánica, ya que, por estadística de Planta Santa Fe, tienden a ser los equipos con mayor impacto en el proceso productivo.

De esta manera, y con la finalidad de representar lo antes mencionado, mediante la Figura 4.4 se presenta la distribución por familias de los equipos criticidad A del área mecánica sin estrategia de mantención definida.

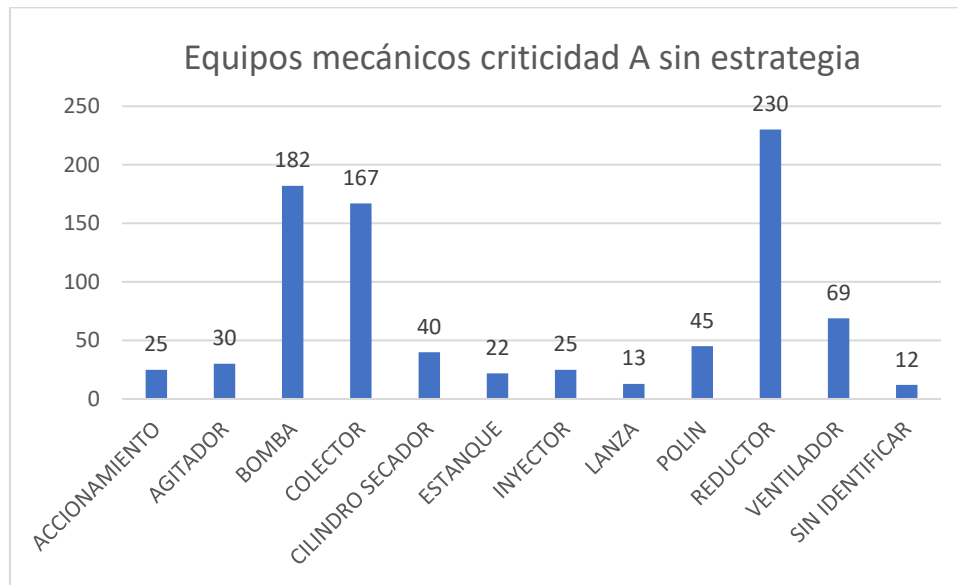


Figura 4.4: Equipos criticidad A área mecánica sin estrategia de mantención definida

4.2 Análisis y caracterización de las estrategias de mantenimiento basadas en el entorno operacional actual de Planta Santa Fe.

4.2.1 Responsabilidades, principios y objetivos que guían las acciones del mantenimiento

El área de mantenimiento es una unidad indispensable que genera valor a la compañía y toma un rol fundamental para el cumplimiento sustentable de los objetivos, entre los que destacan: seguridad, cuidado del medio ambiente, calidad, confiabilidad y rentabilidad. Además, esta es responsable de:

- Administrar eficientemente el presupuesto de mantención.
- Analizar y eliminar las causas de las fallas imprevistas y/o repetitivas.
- Entregar soluciones a los problemas de mantención.
- Desarrollar y ejecutar mejoras de mantención en las diferentes disciplinas.

Dentro de los principios tanto de la organización como del área, se establece que es fundamental:

1. Reconocer la importancia del mantenimiento de los activos en el resultado del negocio.
2. Fomentar el crecimiento de las personas y reconocer su aporte a la organización.
3. Desarrollar estrategias de mantención que permitan administrar el riesgo de los activos dentro de lo establecido.
4. Evaluar constantemente el desempeño tanto de los activos como del área de mantención y establecer estándares de excelencia.
5. Generar un ambiente propicio laboralmente.
6. Centrar actividades en el análisis y mejora constante de los activos.

De esta manera, los objetivos base del área de mantención radican en otorgar la máxima disponibilidad de los activos, asegurando su desempeño y confiabilidad en el mediano y largo plazo, y, así mismo, resguardar un alto nivel de mantenibilidad de estos.

4.2.2 Rol del área de confiabilidad

La ingeniería de confiabilidad es un componente fundamental en la estructura organizacional del mantenimiento, donde el principal foco es garantizar la disponibilidad y el desempeño óptimo de los activos mediante metodologías analíticas y buenas prácticas. A partir de esto, se identifican las siguientes funciones clave:

- Definir estrategias de mantenimiento, criterios y estándares para la implementación y sistematización de técnicas de ingeniería de confiabilidad.
- Promover mejores prácticas mediante la aplicación de estrategias a corto, mediano y largo plazo, enfocado en la reducción de fallas en equipos y sistemas.
- Validar cambios tecnológicos de activos, repuestos, componentes, etc.
- Asegurar el cumplimiento tanto de la normativa [17], [18], así como la legislación vigente relacionada con activos de planta [19], [20] y [21].

Como se puede apreciar, la confiabilidad es una pieza clave en la toma de decisiones de mantenimiento, con influencia directa en la definición de estrategias, cumplimiento normativo y estándares de calidad.

4.2.3 Caracterización estratégica de mantenimiento según la criticidad del activo

El establecer directrices estratégicas acorde a la criticidad de los activos es un punto esencial para una gestión de mantenimiento eficiente y alineada con los objetivos organizacionales. Este enfoque permite priorizar recursos, mitigar riesgos y optimizar la disponibilidad de los equipos.

Como se analizó durante el apartado 4.1.4, la criticidad de un activo está determinada por la gravedad del impacto que puede generar la consecuencia de una falla funcional del activo, donde, para el caso de los equipos en estudio, la criticidad A está ligada a impactos graves respecto de la falla mencionada.

Además, es importante destacar que, con la finalidad de maximizar disponibilidad, dicha criticidad debe contar con la necesidad de operar a plena capacidad cada vez que sea requerido, es decir, una disponibilidad correctiva del 100%.

A continuación, se caracterizan las directrices técnicas y operativas para la gestión estratégica del mantenimiento en Planta Santa Fe, tal como lo presentan las Tablas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, dando a conocer enfoque y objetivo, política de mantención, política de inversión y de repuestos y servicios, servicio de mantenimiento y de ingeniería de mantención, respectivamente.

Tabla 4.4: Enfoque y objetivo de estrategias según criticidad de activos

	Criticidad A	Criticidad B	Criticidad C
Enfoque	Orientación a máxima confiabilidad y disponibilidad de acuerdo a plan de producción.	Orientación a máxima disponibilidad de acuerdo a plan de producción.	Orientación a costo mínimo.

Objetivo	Eliminar intervenciones imprevistas o de emergencia.	Minimizar las intervenciones imprevistas o de emergencia, con foco en reducción de costos globales.	Minimizar el uso de recursos de personal, materiales, servicios y equipamientos.
-----------------	--	---	--

Tabla 4.5: Política de mantención de estrategias según criticidad de activos

	Criticidad A	Criticidad B	Criticidad C
Política de Mantención	<p>Uso de metodologías como RCM, FMECA o similares para establecer o revisar las estrategias de mantención.</p> <p>Obligatorio el monitoreo de las condiciones de los activos (CBM) y de las variables que caracterizan el desempeño de los procesos y equipos (mantenimiento predictivo), conforme un conjunto de reglas y recursos específicos.</p> <p>El uso de controles dedicados a la detección de desviaciones, a través de digitalización de variables y sensores especializados para el mantenimiento predictivo (recursos de Industria 4.0).</p> <p>Aplicación de acciones correctivas y/o soluciones de mejora / modificación, hasta el nivel de componente, siempre que se identifique una falla potencial a través de herramientas de confiabilidad.</p> <p>100% de aplicación de las rutinas de cuidados básicos de mantención: inspección (ajustes), limpieza (control de contaminación) y lubricación</p> <p>Tratamiento hasta el nivel de componente.</p>	<p>Uso de metodologías como RCM, FMECA o similares para revisar las estrategias de mantención establecidas por otros criterios.</p> <p>Obligatorio el monitoreo de las condiciones de los activos (CBM), conforme a reglas de análisis de costo/beneficio.</p> <p>Aplicación de acciones correctivas o de mejora / modificación cuando las herramientas de confiabilidad indiquen viabilidad económica.</p> <p>100% de aplicación de las rutinas de cuidados básicos de mantención: inspección (ajustes), limpieza (control de contaminación) y lubricación.</p> <p>Tratamiento hasta el nivel de equipo o función.</p>	<p>Mantención correctiva cuando sea más económico reparar posterior a la falla / avería.</p> <p>Uso de verificaciones periódicas a través de inspección sensitiva o rutas operacionales.</p> <p>Monitoreo de las condiciones de los activos (CBM) de acuerdo a evaluación costo/beneficio.</p> <p>Aplicación de acciones correctivas o de mejora / modificación cuando se identifique una oportunidad que permita reducir el costo de mantención.</p> <p>Aplicación de las rutinas de cuidados básicos de mantención: inspección (ajustes), limpieza (control de contaminación) y lubricación, según corresponda.</p> <p>Tratamiento hasta el nivel de sistema.</p>

Tabla 4.6: Política de inversión y de repuestos y servicios de estrategias según criticidad de activos

	Criticidad A	Criticidad B	Criticidad C
Política de Inversión	Prioridad de inversión para aumento de confiabilidad.	Prioridad de inversión para mejoras / modificaciones en activos que presentan mayor tasa de fallas y alto costo de mantención.	Prioridad de inversión para reducir el esfuerzo y costos de mantención.
Política de Repuestos y Servicios	<p>Uso de partes y materiales originales y especificados por el fabricante, o equivalentes estrictamente especificados y homologados por Ingeniería de confiabilidad.</p> <p>Disponibilidad asegurada para repuestos de uso recurrente y otros considerados estratégicos.</p> <p>Contratación de servicios externos, prioridad de mano de obra especializada del fabricante del equipamiento. Otras alternativas homologadas y autorizadas por Ingeniería de confiabilidad o por la Subgerencia de Mantención.</p>	<p>Uso de partes y materiales originales y especificados por el fabricante, o equivalentes estrictamente especificados y homologados por ingeniería de confiabilidad.</p> <p>Disponibilidad asegurada para repuestos de uso recurrente. Los artículos de uso probable tendrán prioridad en el desarrollo de acciones para reducir el inventario.</p> <p>Contratación de servicios de mantención no especializada con empresas habilitadas por Ingeniería de confiabilidad y bajo supervisión técnica de personal de mantención propio (CMPC).</p>	<p>Uso preferente de partes y materiales de menor costo, equivalentes a los especificados por los fabricantes.</p> <p>Disponibilidad solo para repuestos de uso recurrente Artículos de uso probable son adquiridos cuando se necesitan.</p> <p>Contratación de servicios de mantención sin restricción para empresas habilitadas por Ingeniería de confiabilidad.</p>

Tabla 4.7: Servicio de mantenimiento de estrategias según criticidad de activos

	Criticidad A	Criticidad B	Criticidad C
Servicio de Mantenimiento	<p>Recursos de mano de obra y supervisión asignados a servicios internos, estrictamente restringidos al nivel más alto de habilidad de la Matriz de Calificación interna o asistencia técnica proporcionada por el fabricante.</p> <p>Cumplimiento riguroso de los procedimientos y estándares de calidad, ajustes y tolerancias, asegurado por herramientas de doble verificación y supervisión dedicada.</p>	<p>Recursos de mano de obra y supervisión asignados a servicios internos, restringidos a los niveles mayor e intermedio de habilidades de la Matriz de calificación interna o de asistencia técnica competente.</p> <p>Cumplimiento riguroso de los procedimientos y estándares de calidad, ajustes y tolerancias, asegurado por supervisión dedicada.</p>	

Máxima prioridad para atención de emergencias, sin interrupciones.	Atención de emergencias con el equipo de Turno Mantenición.	Atención de emergencias con el equipo de Turno Mantenición de acuerdo a prioridades.
Trabajos planificados de acuerdo programa semanal, con máxima prioridad.	Trabajos planificados de acuerdo a programa semanal y criterios de priorización.	Trabajos planificados de acuerdo a programa semanal, criterios de priorización y ejecución por paquetes correctivos más económicos.

Tabla 4.8: Ingeniería de mantenimiento de estrategias según criticidad de activos

	Criticidad A	Criticidad B	Criticidad C
Ingeniería de Mantenimiento	<p>Análisis permanente de datos de desempeño operacional, basados en indicadores específicos de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad (RAM), realizada al nivel de cada equipo.</p> <p>Análisis de falla inmediato para anomalías con riesgo muy alto o alto y cualquier detención / pérdida.</p> <p>. Aplicación de análisis para el aumento de la confiabilidad, a través del desarrollo de soluciones de supervisión y monitoreo de las condiciones operacionales con herramientas de Industria 4.0 y la modificación de configuraciones de las instalaciones (RBD) donde sea económicamente justificable.</p> <p>Desarrollo y revisión de estándares específicos de mantenimiento individualizados para cada equipo.</p>	<p>Análisis periódico de datos de desempeño operacional basados en indicadores agrupados por familias de equipos.</p> <p>Análisis de falla conforme a la tabla de gatillos vinculada a tiempo F/S o pérdidas.</p> <p>Aplicación de análisis para aumentar la confiabilidad, desarrollando soluciones de monitoreo de condiciones operacionales con herramientas de Industria 4.0 (mantenimiento predictivo) cuando sea económicamente justificable.</p> <p>Desarrollo y revisión de estándares específicos de mantenimiento por familia de equipos.</p>	<p>No requieren análisis de desempeño.</p> <p>No requieren análisis de fallas.</p> <p>No requieren análisis para aumento de confiabilidad.</p> <p>No requieren el desarrollo y revisión de procedimientos específicos.</p>

4.2.4 Análisis de oportunidad de intervención según tipo de mantenimiento

En base a las prácticas existentes en Planta Santa Fe, se determina que los tipos de mantenimiento fundamentales son 3: mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo, siendo el mantenimiento proactivo un tipo abordado a partir del correctivo.

A partir de esto, es fundamental identificar la oportunidad de intervención en cada uno de estos tipos de mantenimientos. Para ello, la Tabla 4.9 presenta el criterio fundamental para identificar si la asignación de recursos se da ES, PP, PGP o PNP.

Tabla 4.9: Criterio y oportunidad de intervención de tipos de mantenimiento actuales en planta

Tipo de mantención	Condición de oportunidad respecto a fallas/año	Oportunidad de intervención y asignación de recursos
Correctiva	No aplica	PNP
Preventiva	$\lambda \leq 1$	PGP
Preventiva	$\lambda > 1$	PP
Predictiva	No aplica	ES

Así mismo, es importante destacar que Planta Santa Fe cuenta con 2 líneas de producción: SF1 y SF2, donde λ se calcula para años con ~ 70 días de diferencia entre cada línea de producción.

De esta manera, y gracias a los datos y tiempos que registra el sistema de gestión, es posible definir como KPI para evaluar a futuro la disponibilidad y confiabilidad de equipos, esto mediante (9) y (10), respectivamente.

$$\% \text{ Disponibilidad} = \frac{H_p - \sum H_m}{H_p} \times 100 \quad (9)$$

$$\% \text{ Confiabilidad} = \frac{H_p - \sum H_{mc}}{H_p} \times 100 \quad (10)$$

4.2.5 Identificación de brechas de cobertura y oportunidades de mejora

Una vez analizadas y caracterizadas las directrices estratégicas de mantención presentes en Planta Santa Fe, es posible identificar brechas de cobertura y oportunidades de mejora para cada nivel de criticidad que contribuyan tanto a la planta como a la compañía en general.

Si bien de las Tablas presentadas en el apartado 4.2.3 es posible inferir que gran parte de los activos están cubiertos respecto de una estrategia de mantención según su criticidad, es sumamente importante identificar puntos que considerar, definir u optimizar. A continuación, la Tabla 4.10 presenta las brechas y oportunidades de mejora identificadas.

Tabla 4.10: Brechas de cobertura y oportunidades de mejora según criticidad de activos

	Criticidad A	Criticidad B	Criticidad C
Enfoque y Objetivo	Presenta el foco correcto.	Si bien se minimiza lo correcto, no se refuerzan prácticas de análisis de fallas.	Presenta el foco correcto.
Política de Mantenición	Dependencia tecnológica en el modelo predictivo sin respaldo o renovación clara.	No se considera el monitoreo por condición para activos con historial de falla crítico.	Presenta el foco correcto.
Política de Inversión	Aumento de R(t) sin matriz de control de retorno técnico-económico por intervención.	Sería útil una priorización de ese estilo una vez implementada el monitoreo por condición para estos equipos.	Presenta el foco correcto.
Política de Repuestos y Servicios	Stock estratégico sin consideración de política de rotación y criticidad real actualizada.	Sería más provechoso si dicha estrategia se combina con la estadística de frecuencia real de uso acorde a la criticidad real.	Se recomienda contar con stock mínimo (de bajo costo) que sustenten las funciones claves y así evitar falla en cascada.
Servicio de Mantenimiento	Presenta el foco correcto.	Presenta el foco correcto.	Sería útil establecer evaluaciones periódicas con EPS para validar métodos ejecutados por el Turno.
Ingeniería de Mantenición	Presenta el foco correcto.	Sería útil contar con las desviaciones por equipo y familia a la vez.	Presenta el foco correcto.

4.3 Priorización de activos físicos basada en la metodología de análisis de confiabilidad, costos e impacto productivo.

4.3.1 Comportamiento histórico de fallas mediante análisis Weibull

Para desarrollar, de manera efectiva, una metodología basada en confiabilidad y enfoque RCM que permita definir estrategias de mantenimiento, es necesaria la distribución Weibull, que si bien durante lo abordado en el apartado 2.4.3 deja ver la utilidad de softwares que estimen valores de ciertos parámetros, para ello es necesario contar con la información histórica de fallas de los equipos analizados.

De esta manera, gracias al sistema de gestión de datos de la compañía [16], fue posible obtener la información requerida entre el 01/01/2018 y el 01/03/2025. Esto se efectuó a través de distintas transacciones, donde fue posible descargar: avisos, ordenes de mantenimiento, posiciones y notificaciones de avisos.

Cabe destacar que, por criterio de Planta Santa Fe se determina conveniente efectuar un cruce de información entre avisos y órdenes de mantenimiento, lo cual implica considerar fallas si y sólo si se les asignó una orden de mantención, con lo cual es posible dar con los costos y las fechas de inicio y fin de las fallas, una data estratégica fundamental para el correcto y preciso desarrollo de la distribución antes mencionada.

Por otra parte, contar con el número de avisos permite, mediante las posiciones de estos, considerar los modos, causas y motivos de las fallas, esto con la finalidad de contar con un modelo más estratégico y completo a la hora de evaluar el comportamiento histórico de los equipos analizados y cumplir con el enfoque RCM necesario.

En tanto, contar con el número de órdenes permite, mediante las notificaciones de avisos, considerar el tiempo consumido por cada orden de mantenimiento asignada a un aviso respecto de las fallas consideradas.

Una vez realizado lo anterior, se procedió a incluir las métricas definidas en (1), (2) y (4), para finalmente estimar los valores de los parámetros β y η mediante un código Python basado en el método MLE, el cual es parte del estándar de análisis de confiabilidad de Planta Santa Fe.

A partir de esto, la Tabla 4.11 presenta los resultados obtenidos para los equipos considerados en un tiempo de 86 meses.

Tabla 4.11: Distribución Weibull con métricas consideradas para equipos en estudio

Equipo para MT	N° fallas	MTBF [Días]	MTRR [Horas]	β (Forma)	η (Escala)	Tasa de falla
REDUCTOR 1	47	55,57	5,36	1,06	56,81	6,5581395
LANZA 1	31	81,82	11,75	0,86	75,78	4,3255814
BOMBA 1	29	86,85	10,58	0,74	71,75	4,0465116
COLECTOR 1	28	93,21	19,81	0,89	88,24	3,9069767
BOMBA 2	27	93,82	7,07	1,24	100,63	3,7674419
REDUCTOR 2	26	101,09	8,68	1,16	106,51	3,6279070
REDUCTOR 3	24	107,68	14,42	0,86	99,97	3,3488372
REDUCTOR 4	22	108,72	22,13	1,34	118,42	3,0697674
REDUCTOR 5	22	112,64	12,75	1,19	119,57	3,0697674
REDUCTOR 6	21	113,94	11,63	0,88	106,94	2,9302326
BOMBA 3	19	136,44	15,19	0,8	120,44	2,6511628
BOMBA 4	18	142,23	9,86	0,72	114,64	2,5116279
BOMBA 5	18	145,04	24,68	0,91	138,82	2,5116279
REDUCTOR 7	17	152,22	15,69	0,97	149,99	2,3720930
ESTANQUE 1	16	125,66	19,16	0,82	112,57	2,2325581
BOMBA 6	16	163,95	15,14	1,09	169,49	2,2325581
AGITADOR 1	15	162,93	7,08	0,75	136,72	2,0930233
BOMBA 7	15	166,33	9,85	1,03	168,29	2,0930233
BOMBA 8	15	167,04	18,77	1,09	172,36	2,0930233
BOMBA 9	15	174,35	4,87	1,01	175,26	2,0930233
REDUCTOR 8	14	178,22	9,52	1,04	180,86	1,9534884

REDUCTOR 9	14	180,27	11,08	1,26	193,79	1,9534884
REDUCTOR 10	13	82,34	12,31	0,62	56,84	1,8139535
BOMBA 10	13	140,95	3,14	1,14	147,7	1,8139535
BOMBA 11	13	159,56	14,27	0,67	120,58	1,8139535
REDUCTOR 11	13	182,79	4,83	2,06	206,35	1,8139535
CILINDRO 1	13	190,89	10,61	1,08	196,31	1,8139535
BOMBA 12	13	195,55	8,23	0,9	185,82	1,8139535
BOMBA 13	12	121,25	2,95	0,86	111,92	1,6744186
REDUCTOR 12	12	200,51	19,68	0,76	171,01	1,6744186
AGITADOR 2	12	201,34	12,78	0,68	153,76	1,6744186
BOMBA 14	12	203,73	27,48	0,76	172,05	1,6744186
BOMBA 15	12	204,99	3,73	1,56	228,08	1,6744186
BOMBA 16	12	207,69	10,13	1,27	223,89	1,6744186
CILINDRO 2	12	207,93	22,74	0,96	203,68	1,6744186
REDUCTOR 13	12	209,4	10,74	0,78	182,2	1,6744186
BOMBA 17	12	209,88	1,65	0,93	202,78	1,6744186
REDUCTOR 14	12	210,38	3,73	2,2	237,55	1,6744186
BOMBA 18	12	214,03	13,55	1,08	220,61	1,6744186
REDUCTOR 15	12	214,85	13,43	0,97	211,64	1,6744186
BOMBA 19	11	169,68	14,28	0,72	137,08	1,5348837
AGITADOR 3	11	184,57	1,92	0,78	159,59	1,5348837
BOMBA 20	11	188,08	8,84	0,76	159,3	1,5348837
BOMBA 21	11	189,73	16,36	1,48	209,74	1,5348837
REDUCTOR 16	11	208,04	16,38	0,76	177,27	1,5348837
BOMBA 22	11	213,73	10,65	0,56	127,62	1,5348837
CILINDRO 3	11	221,2	52,25	1,5	245,03	1,5348837
BOMBA 23	11	221,84	12,39	1,18	234,99	1,5348837
AGITADOR 4	11	222,85	22,24	1,04	226,43	1,5348837
COLECTOR 2	11	229,02	17,00	0,86	211,49	1,5348837
REDUCTOR 17	11	231,33	1,68	1,74	259,63	1,5348837
REDUCTOR 18	11	233,06	29,64	0,64	168,06	1,5348837
BOMBA 24	10	210,95	14,97	1,25	226,39	1,3953488
BOMBA 25	10	228,71	9,62	1,56	254,41	1,3953488
POLIN 1	10	235,47	0,72	1,57	262,11	1,3953488
BOMBA 26	10	237,9	11,09	0,74	197,73	1,3953488
BOMBA 27	10	252,37	9,91	0,92	243,08	1,3953488
VENTILADOR 1	10	253,65	9,33	0,81	226,16	1,3953488
REDUCTOR 19	10	256,37	8,01	1,68	287,04	1,3953488
REDUCTOR 20	10	256,6	6,80	0,97	253	1,3953488
REDUCTOR 21	10	258,08	10,16	0,79	225,64	1,3953488
BOMBA 28	10	258,93	10,65	0,79	225,42	1,3953488
CILINDRO 4	10	260,86	22,32	1,17	275,37	1,3953488
BOMBA 29	10	262,22	5,41	1,17	276,86	1,3953488
BOMBA 30	9	194,62	22,74	1,1	201,81	1,2558140
BOMBA 31	9	225,05	13,82	1,06	229,88	1,2558140
BOMBA 32	9	253,02	1,49	1,11	262,67	1,2558140

BOMBA 33	9	253,95	25,93	1,21	270,45	1,2558140
BOMBA 34	9	255,8	11,47	0,9	242,76	1,2558140
REDUCTOR 22	9	263,07	3,00	1,38	288,03	1,2558140
AGITADOR 5	9	265,92	21,75	0,8	234,9	1,2558140
REDUCTOR 23	9	270,52	10,47	0,87	252	1,2558140
CILINDRO 5	9	272	68,13	1,17	287,02	1,2558140
BOMBA 35	9	278,53	9,43	1,09	287,87	1,2558140
BOMBA 36	9	279,85	14,71	0,67	211,62	1,2558140
ESTANQUE 2	9	280,87	9,45	1,26	302,17	1,2558140
BOMBA 37	9	280,93	7,24	1,31	304,48	1,2558140
BOMBA 38	9	281,33	9,74	1,09	290,28	1,2558140
CILINDRO 6	9	283,84	16,37	1,4	311,4	1,2558140
BOMBA 39	9	284,74	18,74	1,22	304,13	1,2558140
REDUCTOR 24	9	285,76	4,77	1,36	311,84	1,2558140
REDUCTOR 25	9	288,52	5,72	1,51	319,93	1,2558140
ACCIONAMIENTO 1	9	290,11	7,82	1,11	301,45	1,2558140
REDUCTOR 26	8	247,65	15,77	0,81	221,21	1,1162791
BOMBA 40	8	249,75	18,42	1,11	259,47	1,1162791
BOMBA 41	8	255,13	25,46	0,76	217,59	1,1162791
VENTILADOR 2	8	264,8	11,66	1,28	285,57	1,1162791
BOMBA 42	8	285,77	1,27	1,19	303,25	1,1162791
BOMBA 43	8	291,69	2,13	0,97	287,62	1,1162791
BOMBA 44	8	295,9	10,79	0,66	218,69	1,1162791
REDUCTOR 27	8	296,21	18,28	0,57	185,68	1,1162791
BOMBA 45	8	296,57	5,23	0,67	225,63	1,1162791
REDUCTOR 28	8	301,95	22,47	1,41	331,57	1,1162791
AGITADOR 6	8	302,25	3,33	0,8	266,42	1,1162791
BOMBA 46	8	307,56	2,64	0,78	267,57	1,1162791
POLIN 2	8	307,66	3,48	1,47	339,85	1,1162791
REDUCTOR 29	8	308,54	9,78	1,38	337,61	1,1162791
BOMBA 47	8	311,57	10,68	0,95	303,89	1,1162791
BOMBA 48	8	311,73	7,13	0,59	203,99	1,1162791
BOMBA 49	8	311,75	10,48	1,3	337,6	1,1162791
CILINDRO 7	8	312,66	1,85	0,94	304,55	1,1162791
REDUCTOR 30	8	323,75	13,97	1,05	329,9	1,1162791
REDUCTOR 31	8	326,61	0,48	0,99	325,71	1,1162791
ACCIONAMIENTO 2	7	235,79	3,80	1,78	265,02	0,9767442
ACCIONAMIENTO 3	7	238,83	2,78	0,64	172,91	0,9767442
REDUCTOR 32	7	271,39	5,36	0,92	261,18	0,9767442
REDUCTOR 33	7	277,61	2,62	0,67	209,99	0,9767442
REDUCTOR 34	7	282,69	20,17	1,67	316,43	0,9767442
BOMBA 50	7	292,33	59,28	1,67	327,23	0,9767442
BOMBA 51	7	301,34	15,48	1,01	302,19	0,9767442
REDUCTOR 35	7	303,96	0,67	0,87	283,08	0,9767442
BOMBA 52	7	311,73	3,64	1,42	342,93	0,9767442
BOMBA 53	7	314,14	0,30	0,72	255,95	0,9767442

CILINDRO 8	7	314,87	5,60	1,3	340,75	0,9767442
CILINDRO 9	7	317,45	2,28	1,55	352,84	0,9767442
REDUCTOR 36	7	336,48	27,22	0,77	287,67	0,9767442
CILINDRO 10	7	340,87	7,80	1,93	384,32	0,9767442
CILINDRO 11	7	350,18	8,63	1,5	387,97	0,9767442
CILINDRO 12	7	351,62	61,94	0,86	326,31	0,9767442
CILINDRO 13	7	351,78	1,86	0,87	327	0,9767442
BOMBA 54	7	352,49	6,45	1,26	379,27	0,9767442
BOMBA 55	7	352,86	13,91	1,65	394,52	0,9767442
BOMBA 56	7	357,15	3,09	1,81	401,71	0,9767442
BOMBA 57	7	361,05	8,34	2,69	406,08	0,9767442
REDUCTOR 37	7	362,81	1,86	0,9	344,03	0,9767442
BOMBA 58	7	364,83	15,86	1,9	411,12	0,9767442
REDUCTOR 38	7	369,81	3,46	1,15	388,91	0,9767442
BOMBA 59	7	369,93	1,40	0,83	335,62	0,9767442
REDUCTOR 39	7	371,53	6,04	0,74	309,66	0,9767442
BOMBA 60	7	373,09	11,95	0,96	366,44	0,9767442
CILINDRO 14	7	373,84	3,04	0,99	373,03	0,9767442
CILINDRO 15	7	377,77	7,21	0,86	348,92	0,9767442
AGITADOR 7	7	395,89	18,35	0,52	211,97	0,9767442
BOMBA 61	7	397,53	3,23	0,66	296,36	0,9767442
AGITADOR 8	6	146,88	0,00	0,67	111,43	0,8372093
VENTILADOR 3	6	151,6	9,33	1,22	161,82	0,8372093
BOMBA 62	6	272,25	22,00	0,75	229,81	0,8372093
BOMBA 63	6	284,53	10,30	1,31	308,33	0,8372093
BOMBA 64	6	294,24	22,80	1,13	307,4	0,8372093
BOMBA 65	6	295,54	16,30	1,47	326,56	0,8372093
VENTILADOR 4	6	317,32	9,75	1,43	349,31	0,8372093
BOMBA 66	6	319,75	11,15	0,76	271,39	0,8372093
LINEA 1	6	329,64	18,14	0,87	306,34	0,8372093
REDUCTOR 40	6	333,26	-	0,94	323,66	0,8372093
BOMBA 67	6	360,02	0,97	0,78	312,02	0,8372093
CILINDRO 16	6	362,02	0,63	0,98	359,27	0,8372093
REDUCTOR 41	6	363,01	5,00	1,16	382,55	0,8372093
BOMBA 68	6	366,53	2,93	0,67	276,62	0,8372093
CILINDRO 17	6	381,01	4,87	0,8	335,33	0,8372093
BOMBA 69	6	395,71	14,49	1,14	414,54	0,8372093
REDUCTOR 42	6	395,72	15,48	1,01	396,74	0,8372093
CILINDRO 18	6	397,59	80,67	1,3	430,28	0,8372093
REDUCTOR 43	6	397,71	105,66	1,27	428,2	0,8372093
AGITADOR 9	6	410,89	8,00	0,96	403,01	0,8372093
CILINDRO 19	6	413,24	4,82	1,83	465,05	0,8372093
LINEA 2	6	413,88	11,36	1,5	458,39	0,8372093
BOMBA 70	6	414,77	14,26	0,99	412,39	0,8372093
REDUCTOR 44	6	418,78	16,89	1,58	466,56	0,8372093
BOMBA 71	6	422,6	13,78	1,83	475,58	0,8372093

REDUCTOR 45	6	426,3	13,10	1,14	446,93	0,8372093
REDUCTOR 46	6	427,9	18,05	1,11	444,41	0,8372093
POLIN 3	6	428,87	18,20	1,8	482,28	0,8372093
REDUCTOR 47	6	431,09	3,68	0,66	322,76	0,8372093
CILINDRO 20	6	432,62	6,01	0,98	428,07	0,8372093
REDUCTOR 48	6	437,79	2,55	1,39	479,87	0,8372093
AGITADOR 10	5	164,49	11,05	1,04	167,17	0,6976744
BOMBA 72	5	207,66	11,08	0,71	165,5	0,6976744
BOMBA 73	5	252,36	6,53	0,79	220,47	0,6976744
AGITADOR 11	5	257,68	17,74	1,19	273,04	0,6976744
REDUCTOR 49	5	268,41	5,48	1,45	295,91	0,6976744
AGITADOR 12	5	276,67	4,94	3,47	307,64	0,6976744
BOMBA 74	5	316,95	7,80	1,47	350,22	0,6976744
CILINDRO 21	5	321,19	9,68	1,37	351,16	0,6976744
POLIN 4	5	324,54	0,00	0,9	308,61	0,6976744
BOMBA 75	5	373,44	0,60	0,94	362,37	0,6976744
BOMBA 76	5	383,91	16,33	0,62	267,89	0,6976744
BOMBA 77	5	415,5	29,01	1,26	447,1	0,6976744
BOMBA 78	5	426,6	8,97	0,85	391,95	0,6976744
BOMBA 79	5	428,29	16,77	0,65	315,19	0,6976744
REDUCTOR 50	5	433,09	0,90	1,73	486	0,6976744
VENTILADOR 5	5	442,9	9,50	1,08	456,72	0,6976744
BOMBA 80	5	446,6	12,42	0,77	384,17	0,6976744
REDUCTOR 51	5	454,94	7,64	1,01	456,78	0,6976744
REDUCTOR 52	5	456,49	19,27	1,32	496,1	0,6976744
REDUCTOR 53	5	468,32	1,13	1,71	524,99	0,6976744
BOMBA 81	5	469,92	9,45	1,94	529,92	0,6976744
BOMBA 82	5	472,18	10,77	0,64	340,98	0,6976744
REDUCTOR 54	5	477,43	26,35	1,44	526,19	0,6976744
BOMBA 83	5	479,39	15,12	0,93	464,51	0,6976744
REDUCTOR 55	5	479,44	5,82	3,22	535,17	0,6976744
CILINDRO 22	5	491,4	5,15	1,85	553,28	0,6976744
REDUCTOR 56	5	492,26	24,75	1,17	519,92	0,6976744
REDUCTOR 57	5	497,73	5,97	1,2	528,9	0,6976744
CILINDRO 23	5	499	1,97	0,87	465,79	0,6976744
BOMBA 84	5	501,95	3,53	0,74	417,17	0,6976744
REDUCTOR 58	5	507,29	5,32	1,78	570,2	0,6976744
REDUCTOR 59	5	512,69	8,13	0,93	494,88	0,6976744
COLECTOR 3	5	514,15	10,34	1,26	552,98	0,6976744
REDUCTOR 60	5	514,67	0,00	0,74	425,7	0,6976744
BOMBA 85	5	516,66	18,94	1,39	566,32	0,6976744
BOMBA 86	5	520,61	8,34	0,72	421,84	0,6976744
BOMBA 87	5	521,1	3,77	1,51	577,81	0,6976744
REDUCTOR 61	5	521,6	1,03	0,8	462,33	0,6976744
CILINDRO 24	5	524,31	3,80	1,34	570,64	0,6976744
CILINDRO 25	5	537,57	6,88	0,56	326,79	0,6976744

CILINDRO 26	5	614,78	2,83	0,52	333,51	0,6976744
ACCIONAMIENTO 4	4	305,19	2,68	0,74	253,67	0,5581395
AGITADOR 13	4	310,73	19,80	0,82	280,02	0,5581395
REDUCTOR 62	4	333,07	9,32	3,04	372,74	0,5581395
BOMBA 88	4	357,83	7,00	2,4	403,64	0,5581395
BOMBA 89	4	395,52	2,25	1,4	433,72	0,5581395
VENTILADOR 6	4	399,42	3,70	1,16	421,03	0,5581395
BOMBA 90	4	412,69	10,90	1,27	444,46	0,5581395
BOMBA 91	4	440,06	8,13	2,8	494,19	0,5581395
BOMBA 92	4	447,12	2,78	0,77	383,47	0,5581395
REDUCTOR 63	4	448,96	1,01	1,01	450,6	0,5581395
BOMBA 93	4	451,38	4,15	1,41	495,81	0,5581395
VENTILADOR 7	4	465,25	5,75	1,34	506,75	0,5581395
REDUCTOR 64	4	509,12	6,00	1,07	522,11	0,5581395
REDUCTOR 65	4	514,16	2,00	0,67	389,16	0,5581395
BOMBA 94	4	514,94	26,23	3,83	569,55	0,5581395
AGITADOR 14	4	533,15	12,40	0,66	398,06	0,5581395
VENTILADOR 8	4	537,33	5,13	4,58	588,24	0,5581395
BOMBA 95	4	538,72	4,90	1,21	573,41	0,5581395
REDUCTOR 66	4	540,26	3,55	1,64	603,77	0,5581395
VENTILADOR 9	4	559,11	25,00	1,01	560,92	0,5581395
BOMBA 96	4	561,35	2,90	0,89	529,55	0,5581395
BOMBA 97	4	573,97	23,03	0,64	414,09	0,5581395
REDUCTOR 67	4	583,97	4,18	2,61	657,37	0,5581395
CILINDRO 27	4	607,08	2,10	0,69	475,77	0,5581395
BOMBA 98	4	610,33	2,97	1,57	679,7	0,5581395
REDUCTOR 68	4	618,14	3,73	0,82	556,11	0,5581395
CILINDRO 28	4	620,19	10,63	2,29	700,1	0,5581395
LINEA 3	4	633,82	5,26	1,37	692,84	0,5581395
REDUCTOR 69	4	634,44	24,13	1,57	706,14	0,5581395
CILINDRO 29	4	640,63	3,80	0,78	555,33	0,5581395
REDUCTOR 70	4	641,53	7,90	1,31	696,06	0,5581395
BOMBA 99	4	645,64	1,20	0,98	639,51	0,5581395
AGITADOR 15	4	646,82	9,13	0,81	573,74	0,5581395
ESTANQUE 3	4	658,63	16,49	0,77	565,95	0,5581395
REDUCTOR 71	3	151,89	2,43	3,4	169,06	0,4186047
VENTILADOR 10	3	157,66	0,65	1,11	163,66	0,4186047
CILINDRO 30	3	191,76	6,80	1,75	215,34	0,4186047
BOMBA 100	3	259,2	8,13	1,9	292,07	0,4186047
AGITADOR 16	3	264,63	0,00	1,43	291,17	0,4186047
BOMBA 101	3	277,97	14,71	1,17	293,68	0,4186047
LINEA 4	3	293,55	13,17	0,89	278,03	0,4186047
CILINDRO 31	3	326	2,07	1,51	361,34	0,4186047
BOMBA 102	3	348,24	83,90	3,15	389,12	0,4186047
LINEA 5	3	391,02	3,30	0,83	352,85	0,4186047
BOMBA 103	3	411,29	6,34	5,59	445,08	0,4186047

REDUCTOR 72	3	412,71	22,00	1,33	448,56	0,4186047
LANZA 2	3	444,79	9,47	1,34	484,7	0,4186047
BOMBA 104	3	460,55	16,60	0,52	248,85	0,4186047
VENTILADOR 11	3	495,29	4,50	0,65	363,58	0,4186047
VENTILADOR 12	3	517,16	4,40	1,9	582,78	0,4186047
POLIN 5	3	519,51	9,50	0,77	445,69	0,4186047
VENTILADOR 13	3	526,1	12,53	0,98	521,45	0,4186047
BOMBA 105	3	528,68	-	1,03	535,12	0,4186047
BOMBA 106	3	529,73	7,68	1,26	569,64	0,4186047
BOMBA 107	3	530,66	7,90	2,08	599,1	0,4186047
LINEA 6	3	540,42	8,78	1,29	583,87	0,4186047
REDUCTOR 73	3	548,82	15,53	0,45	222,31	0,4186047
CILINDRO 32	3	569,97	1,75	2,63	641,52	0,4186047
BOMBA 108	3	577,43	0,75	1,06	590,79	0,4186047
AGITADOR 17	3	614,05	15,47	2,28	693,19	0,4186047
BOMBA 109	3	620,79	7,93	1,4	680,92	0,4186047
ACCIONAMIENTO 5	3	623,62	6,78	0,53	350,35	0,4186047
REDUCTOR 74	3	640,68	0,67	0,64	462	0,4186047
LINEA 7	3	648	17,33	0,81	574,49	0,4186047
BOMBA 110	3	688,71	13,93	0,68	528,19	0,4186047
POLIN 6	3	694,48	10,00	0,85	638,26	0,4186047
BOMBA 111	3	695,72	6,20	2,51	784,01	0,4186047
CILINDRO 33	3	714,85	1,80	2,36	806,64	0,4186047
REDUCTOR 75	3	721,83	2,00	1,62	806,15	0,4186047
REDUCTOR 76	3	733,44	1,75	0,7	577,89	0,4186047
BOMBA 112	3	746,07	15,95	0,94	724,51	0,4186047
BOMBA 113	3	764,89	1,08	1,14	801,34	0,4186047
REDUCTOR 77	3	767,11	8,30	1,45	845,78	0,4186047
BOMBA 114	3	768,95	17,80	1,5	851,5	0,4186047
VENTILADOR 14	3	776,1	5,93	0,65	572,4	0,4186047
AGITADOR 18	3	782,43	29,53	1,37	855,68	0,4186047
LINEA 8	3	795,84	-	2,68	895,13	0,4186047
REDUCTOR 78	3	800,42	1,00	2,33	903,32	0,4186047
AGITADOR 19	3	821,61	6,78	0,92	792,01	0,4186047
BOMBA 115	3	822,27	3,25	0,87	764,62	0,4186047
REDUCTOR 79	3	824,51	14,55	2,45	929,69	0,4186047
CILINDRO 34	3	832,94	4,75	1,32	903,97	0,4186047
REDUCTOR 80	3	847,69	40,00	1,19	899,37	0,4186047
LINEA 9	3	849,51	2,25	1,25	911,56	0,4186047
ACCIONAMIENTO 6	3	850,53	6,17	10,2	893,28	0,4186047
REDUCTOR 81	3	852,74	13,80	2,39	962	0,4186047
REDUCTOR 82	3	854,79	0,00	2,72	961,01	0,4186047
CILINDRO 35	3	855,53	1,57	1,38	936,81	0,4186047
REDUCTOR 83	3	864,3	0,00	1,25	927,8	0,4186047
CILINDRO 36	3	867,57	11,93	1,69	972,1	0,4186047
LINEA 10	3	873,26	18,15	3,1	976,41	0,4186047

REDUCTOR 84		3		1077,21		26,14		0,55		628,47		0,4186047
-------------	--	---	--	---------	--	-------	--	------	--	--------	--	-----------

De esta manera, cabe destacar que, gracias a las consideraciones propias del estándar del análisis de confiabilidad de Planta Santa Fe, se logró reducir de 860 equipos mecánicos de criticidad A sin estrategia definida a tan solo 298 de estos que si tienen una repercusión en la confiabilidad tanto del área mecánica como del proceso productivo.

4.3.2 Priorización de activos con historial de falla mediante análisis de Pareto y Jack Knife

En el marco de la priorización de activos físicos a través de herramientas de confiabilidad, resulta indispensable incorporar estadísticas que permitan identificar patrones relevantes y evaluar la estabilidad de los resultados obtenidos, en este caso, mediante análisis Weibull.

Así mismo, los análisis tanto de Pareto como Jack Knife ofrecen un enfoque fundamental para priorizar equipos críticos, donde, en conjunto, no sólo buscan optimizar la interpretación estadística, sino también fortalecer la validez de las decisiones tomadas a lo largo del estudio.

De esta manera, y acorde a lo presentado en el punto 4.2.1, las Figuras 4.5 y 4.6 presentan el análisis de Pareto por familia de equipos y por equipos para una tasa de falla mayor o igual a 2, respectivamente.

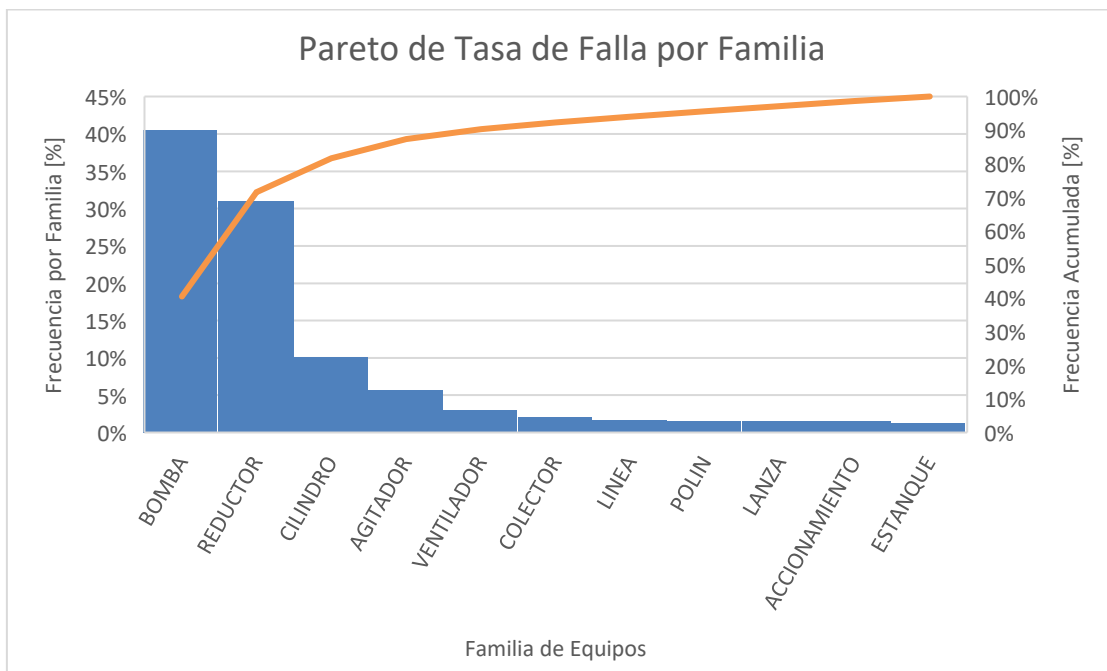


Figura 4.5: Análisis de Pareto por familia de equipos

De esta manera, ya es posible visualizar las familias de equipos (y a continuación los equipos) que presentan mayor cantidad de fallas en el período estudiado.

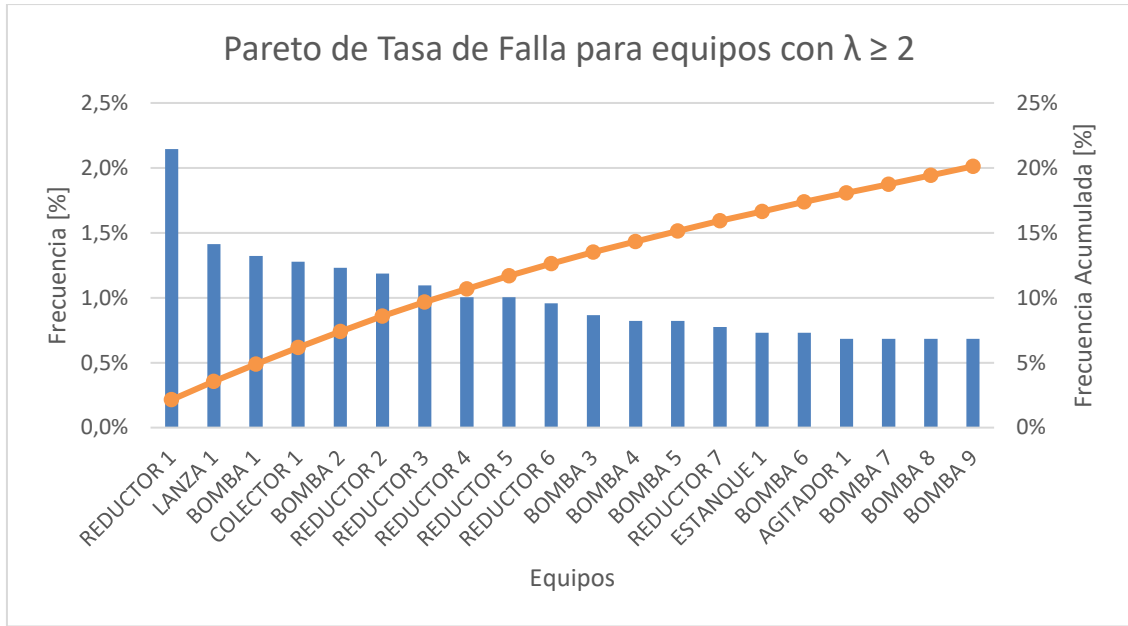


Figura 4.6: Análisis de Pareto por equipo para $\lambda \geq 2$

En tanto, acorde a lo presentado en el punto 4.2.2, la Figura 4.7 presenta el análisis mediante la teoría de Jack Knife, en el cual se encuentran graficados 289 de 298 equipos, ya que 3 de ellos no presentan MTTR y 6 de ellos presentan MTTR igual a 0. Sin embargo, estos últimos si se encuentran considerados en el análisis matemático que plantea Jack Knife, el cual se presenta en el Anexo A, donde también es posible verificar el ítem asignado para cada equipo en cuestión.

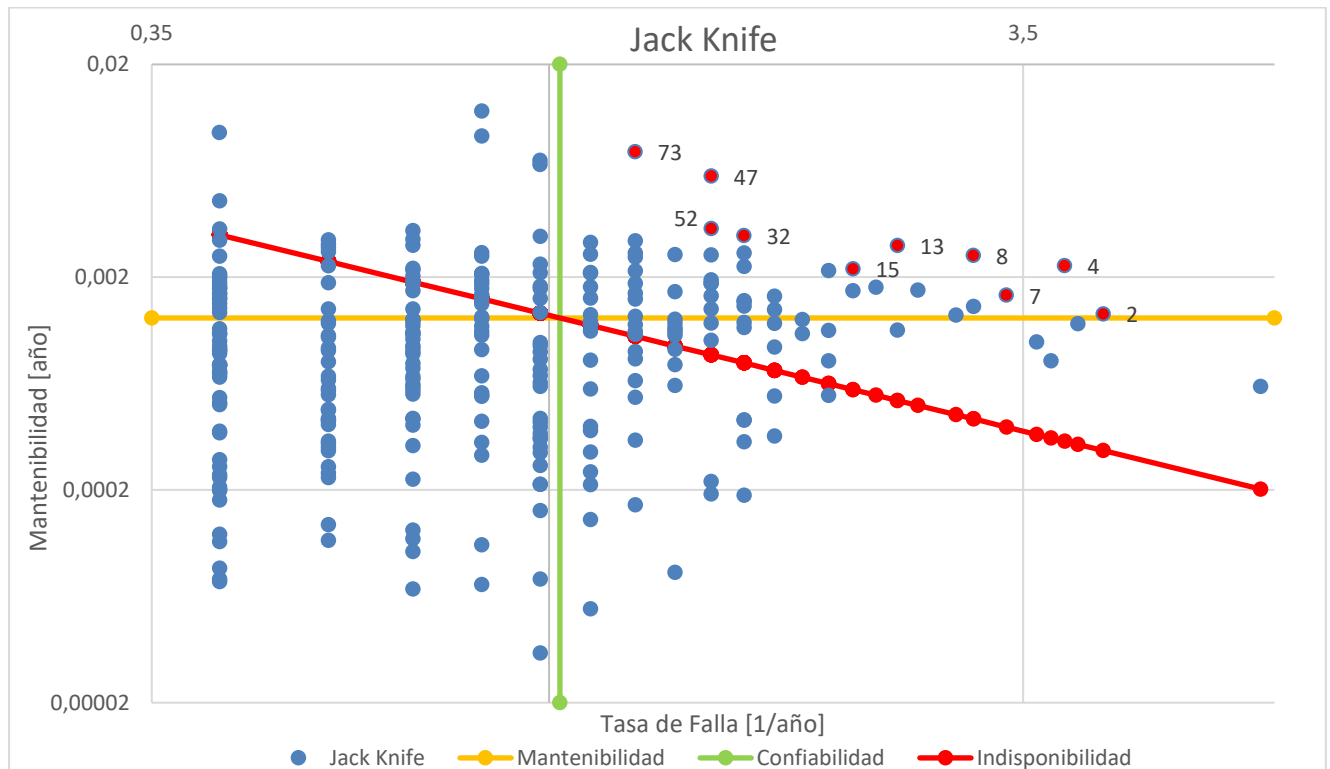


Figura 4.7: Análisis de Jack Knife para equipos en estudio

Así mismo, gracias a la Figura 4.7 es posible visualizar los equipos que se encuentran en la zona aguda y crónica (cuadrante I), es decir, los equipos con tiempo medio de reparación y frecuencia de falla por sobre el promedio del estudio, para cada métrica respectivamente. De esta manera, los puntos marcados en rojo representan los 10 equipos con mayor indisponibilidad del total analizado.

De esta manera, gracias a Weibull, Pareto y Jack Knife, ya es posible tener un acercamiento a la familia y/o los equipos que pudiesen ser más representativos respecto de la muestra.

4.3.3 Priorización de activos con historial de falla a través de costos e índices de producción

Con el objetivo de enfocar los esfuerzos de mantenimiento en los activos más representativos para realizar análisis FMECA y definir estrategias de mantenimiento para equipos mecánicos criticidad A, se incorpora un análisis sobre el impacto económico y productivo asociado a su historial de fallas.

Así, es posible jerarquizar los activos considerando tanto los costos implicados como su influencia directa en la continuidad operativa. De esta forma, se establecen criterios objetivos para orientar la toma de decisiones y optimizar la gestión de recursos técnicos y económicos.

A continuación, la Tabla 4.12 y 4.13 presentan los costos asociados a cada uno de estos equipos y la pérdida de producción asociada bajo el criterio de “mal actor” establecido por Planta Santa Fe, donde para equipos de SF1 aplica para pérdidas sobre el 0,4 [%] y para SF2 sobre el 1 [%] de las Adt promedio pérdidas por año en toda la planta, respectivamente.

Tabla 4.12: Costos asociados por equipo

EQUIPO PARA MT	Costos Totales	EQUIPO PARA MT	Costos Totales
REDUCTOR 1	\$ 62.068.870	BOMBA 69	\$ 10.105.728
LANZA 1	\$ 53.109.478	REDUCTOR 42	\$ 7.203.572
BOMBA 1	\$ 294.697.870	CILINDRO 18	\$ 90.095.514
COLECTOR 1	\$ 82.883.126	REDUCTOR 43	\$ 17.911.989
BOMBA 2	\$ 180.773.742	AGITADOR 9	\$ 29.245.167
REDUCTOR 2	\$ 35.915.606	CILINDRO 19	\$ 5.775.158
REDUCTOR 3	\$ 52.765.239	LINEA 2	\$ 971.068
REDUCTOR 4	\$ 215.763.139	BOMBA 70	\$ 11.824.246
REDUCTOR 5	\$ 12.740.901	REDUCTOR 44	\$ -
REDUCTOR 6	\$ 170.395.050	BOMBA 71	\$ 9.440.588
BOMBA 3	\$ 93.335.952	REDUCTOR 45	\$ 56.045.596
BOMBA 4	\$ 134.597.570	REDUCTOR 46	\$ 5.273.757
BOMBA 5	\$ 70.659.293	POLIN 3	\$ 764.504
REDUCTOR 7	\$ 70.347.564	REDUCTOR 47	\$ 2.010.747
ESTANQUE 1	\$ 22.731.715	CILINDRO 20	\$ 9.839.118
BOMBA 6	\$ 46.590.190	REDUCTOR 48	\$ -
AGITADOR 1	\$ 1.102.407	AGITADOR 10	\$ 2.779.544
BOMBA 7	\$ 42.884.463	BOMBA 72	\$ 5.657.696
BOMBA 8	\$ 210.499.763	BOMBA 73	\$ 1.124.588
BOMBA 9	\$ 59.593.913	AGITADOR 11	\$ 1.836.810

REDUCTOR 8	\$ 15.733.819	REDUCTOR 49	\$ 860.650
REDUCTOR 9	\$ 4.843.413	AGITADOR 12	\$ 5.293.753
REDUCTOR 10	\$ 54.041.457	BOMBA 74	\$ 13.864.269
BOMBA 10	\$ 9.291.843	CILINDRO 21	\$ 5.809.599
BOMBA 11	\$ 11.816.798	POLIN 4	\$ 1.562.658
REDUCTOR 11	\$ -	BOMBA 75	\$ 335.844
CILINDRO 1	\$ 22.795.657	BOMBA 76	\$ 12.732.273
BOMBA 12	\$ 35.237.849	BOMBA 77	\$ 11.656.762
BOMBA 13	\$ 25.902.347	BOMBA 78	\$ 15.640.560
REDUCTOR 12	\$ 59.086.198	BOMBA 79	\$ 18.686.752
AGITADOR 2	\$ 61.314.698	REDUCTOR 50	\$ 5.679.195
BOMBA 14	\$ 9.153.525	VENTILADOR 5	\$ 713.644
BOMBA 15	\$ 17.748.990	BOMBA 80	\$ 10.420.916
BOMBA 16	\$ 21.705.082	REDUCTOR 51	\$ 15.903.674
CILINDRO 2	\$ 88.033.619	REDUCTOR 52	\$ 8.987.559
REDUCTOR 13	\$ 7.524.313	REDUCTOR 53	\$ 257.959
BOMBA 17	\$ 1.824.712	BOMBA 81	\$ 2.276.872
REDUCTOR 14	\$ 5.299.391	BOMBA 82	\$ 483.593
BOMBA 18	\$ 61.230.811	REDUCTOR 54	\$ 12.706.290
REDUCTOR 15	\$ 7.969.967	BOMBA 83	\$ 13.355.297
BOMBA 19	\$ 7.356.002	REDUCTOR 55	\$ 12.722
AGITADOR 3	\$ 2.877.149	CILINDRO 22	\$ 20.016.018
BOMBA 20	\$ 37.849.197	REDUCTOR 56	\$ 2.291.751
BOMBA 21	\$ 44.674.638	REDUCTOR 57	\$ -
REDUCTOR 16	\$ 11.236.714	CILINDRO 23	\$ 10.616.114
BOMBA 22	\$ 633.886	BOMBA 84	\$ 1.315.129
CILINDRO 3	\$ 123.823.862	REDUCTOR 58	\$ 2.259.593
BOMBA 23	\$ 19.683.392	REDUCTOR 59	\$ 22.830.559
AGITADOR 4	\$ 15.214.937	COLECTOR 3	\$ 6.926.100
COLECTOR 2	\$ 6.242.448	REDUCTOR 60	\$ 1.328.752
REDUCTOR 17	\$ 7.091.606	BOMBA 85	\$ 75.302.635
REDUCTOR 18	\$ 18.680.049	BOMBA 86	\$ 311.000
BOMBA 24	\$ 12.036.745	BOMBA 87	\$ 3.945.345
BOMBA 25	\$ 109.543.068	REDUCTOR 61	\$ 661.732
POLIN 1	\$ 3.278.103	CILINDRO 24	\$ 3.614.798
BOMBA 26	\$ 72.661.287	CILINDRO 25	\$ 35.722.747
BOMBA 27	\$ 22.718.400	CILINDRO 26	\$ 5.920.713
VENTILADOR 1	\$ 314.449	ACCIONAMIENTO 4	\$ 6.753.202
REDUCTOR 19	\$ 10.154.208	AGITADOR 13	\$ 5.197.213
REDUCTOR 20	\$ 7.099.186	REDUCTOR 62	\$ -
REDUCTOR 21	\$ 5.614.410	BOMBA 88	\$ 3.676.006
BOMBA 28	\$ 28.073.335	BOMBA 89	\$ 4.879.283
CILINDRO 4	\$ 17.104.426	VENTILADOR 6	\$ 7.218.949
BOMBA 29	\$ 45.561.141	BOMBA 90	\$ 10.272.443
BOMBA 30	\$ 58.067.957	BOMBA 91	\$ 53.889
BOMBA 31	\$ 17.878.864	BOMBA 92	\$ 5.500.000

BOMBA 32	\$ 13.441.692	REDUCTOR 63	\$ 14.550.724
BOMBA 33	\$ 51.112.357	BOMBA 93	\$ 14.316.140
BOMBA 34	\$ 11.570.626	VENTILADOR 7	\$ 641.323
REDUCTOR 22	\$ 7.114.900	REDUCTOR 64	\$ 410.969
AGITADOR 5	\$ 30.168.088	REDUCTOR 65	\$ 2.374.896
REDUCTOR 23	\$ 10.828.222	BOMBA 94	\$ 3.542.601
CILINDRO 5	\$ 87.845.889	AGITADOR 14	\$ 5.242.699
BOMBA 35	\$ 8.474.537	VENTILADOR 8	\$ 577.074
BOMBA 36	\$ 5.857.665	BOMBA 95	\$ 3.400.939
ESTANQUE 2	\$ 17.156.505	REDUCTOR 66	\$ -
BOMBA 37	\$ 23.974.078	VENTILADOR 9	\$ 742.799
BOMBA 38	\$ 232.520.053	BOMBA 96	\$ 1.254.223
CILINDRO 6	\$ 21.156.187	BOMBA 97	\$ 100.094.597
BOMBA 39	\$ 19.770.845	REDUCTOR 67	\$ 1.917.481
REDUCTOR 24	\$ 9.167.711	CILINDRO 27	\$ 71.102.805
REDUCTOR 25	\$ 820.614	BOMBA 98	\$ 5.601.668
ACCIONAMIENTO 1	\$ 137.329.336	REDUCTOR 68	\$ 2.233.675
REDUCTOR 26	\$ 5.085.294	CILINDRO 28	\$ 24.071.212
BOMBA 40	\$ 13.663.305	LINEA 3	\$ -
BOMBA 41	\$ 132.617.903	REDUCTOR 69	\$ 50.199.729
VENTILADOR 2	\$ 1.479.457	CILINDRO 29	\$ 1.519.836
BOMBA 42	\$ 14.205.466	REDUCTOR 70	\$ 1.486.947
BOMBA 43	\$ 1.260.912	BOMBA 99	\$ 124.516.764
BOMBA 44	\$ 4.280.195	AGITADOR 15	\$ 1.059.538
REDUCTOR 27	\$ -	ESTANQUE 3	\$ 2.936.097
BOMBA 45	\$ 15.887.352	REDUCTOR 71	\$ 93.989
REDUCTOR 28	\$ 8.320.906	VENTILADOR 10	\$ 4.410.906
AGITADOR 6	\$ 18.673.280	CILINDRO 30	\$ 465.500
BOMBA 46	\$ 35.321.666	BOMBA 100	\$ 2.662.701
POLIN 2	\$ 1.652.884	AGITADOR 16	\$ 29.828.487
REDUCTOR 29	\$ 6.694.989	BOMBA 101	\$ 7.001.276
BOMBA 47	\$ 13.250.763	LINEA 4	\$ 34.683.729
BOMBA 48	\$ 8.291.719	CILINDRO 31	\$ 1.585.893
BOMBA 49	\$ 31.540.117	BOMBA 102	\$ 1.756.691
CILINDRO 7	\$ 18.755.759	LINEA 5	\$ 15.884.269
REDUCTOR 30	\$ 4.816.001	BOMBA 103	\$ 5.972.825
REDUCTOR 31	\$ 12.271.528	REDUCTOR 72	\$ 797.746
ACCIONAMIENTO 2	\$ 4.240.972	LANZA 2	\$ 11.674.215
ACCIONAMIENTO 3	\$ 384.179	BOMBA 104	\$ 9.377.118
REDUCTOR 32	\$ 32.609.174	VENTILADOR 11	\$ 385.313
REDUCTOR 33	\$ 9.731.467	VENTILADOR 12	\$ 2.672.209
REDUCTOR 34	\$ 10.469.738	POLIN 5	\$ 17.865.755
BOMBA 50	\$ 14.470.573	VENTILADOR 13	\$ 6.486.493
BOMBA 51	\$ 28.852.613	BOMBA 105	\$ 40.995.000
REDUCTOR 35	\$ 4.944.971	BOMBA 106	\$ 8.649.728
BOMBA 52	\$ 7.248.489	BOMBA 107	\$ 24.194.004

BOMBA 53	\$ 5.996.707	LINEA 6	\$ 5.133.523
CILINDRO 8	\$ 18.833.567	REDUCTOR 73	\$ 27.952.768
CILINDRO 9	\$ 9.006.911	CILINDRO 32	\$ 2.161.913
REDUCTOR 36	\$ 8.634.857	BOMBA 108	\$ 9.037.781
CILINDRO 10	\$ 5.769.173	AGITADOR 17	\$ 5.863.557
CILINDRO 11	\$ 19.721.969	BOMBA 109	\$ 713.130
CILINDRO 12	\$ 127.030.307	ACCIONAMIENTO 5	\$ 1.974.645
CILINDRO 13	\$ 17.067.219	REDUCTOR 74	\$ 1.868.685
BOMBA 54	\$ 17.958.709	LINEA 7	\$ 483.317
BOMBA 55	\$ 18.765.913	BOMBA 110	\$ 22.629.567
BOMBA 56	\$ 10.674.934	POLIN 6	\$ 10.507.322
BOMBA 57	\$ 22.721.369	BOMBA 111	\$ 3.705.463
REDUCTOR 37	\$ 5.610.849	CILINDRO 33	\$ 2.908.110
BOMBA 58	\$ 50.571.431	REDUCTOR 75	\$ 2.681.132
REDUCTOR 38	\$ 9.625.537	REDUCTOR 76	\$ -
BOMBA 59	\$ 11.650.212	BOMBA 112	\$ 11.267.043
REDUCTOR 39	\$ 2.611.986	BOMBA 113	\$ 5.039.721
BOMBA 60	\$ 11.776.538	REDUCTOR 77	\$ -
CILINDRO 14	\$ 19.383.491	BOMBA 114	\$ 2.931.147
CILINDRO 15	\$ 17.448.316	VENTILADOR 14	\$ 1.523.964
AGITADOR 7	\$ 22.727.261	AGITADOR 18	\$ 485.024
BOMBA 61	\$ 1.883.250	LINEA 8	\$ 4.573.542
AGITADOR 8	\$ 4.830.200	REDUCTOR 78	\$ 2.059.182
VENTILADOR 3	\$ 17.219.671	AGITADOR 19	\$ 18.932.792
BOMBA 62	\$ 24.006.362	BOMBA 115	\$ 684.190
BOMBA 63	\$ 19.126.623	REDUCTOR 79	\$ 620.496
BOMBA 64	\$ 21.780.948	CILINDRO 34	\$ 521.107
BOMBA 65	\$ 10.755.007	REDUCTOR 80	\$ -
VENTILADOR 4	\$ 7.329.390	LINEA 9	\$ 1.575.562
BOMBA 66	\$ 16.335.314	ACCIONAMIENTO 6	\$ 14.794.003
LINEA 1	\$ 9.102.746	REDUCTOR 81	\$ 3.080.251
REDUCTOR 40	\$ 1.793.045	REDUCTOR 82	\$ 1.975.040
BOMBA 67	\$ 78.403.140	CILINDRO 35	\$ 1.844.515
CILINDRO 16	\$ 25.486.891	REDUCTOR 83	\$ -
REDUCTOR 41	\$ 1.746.965	CILINDRO 36	\$ 3.234.859
BOMBA 68	\$ 30.534.139	LINEA 10	\$ 5.748.811
CILINDRO 17	\$ 3.373.112	REDUCTOR 84	\$ 4.763.794

Tabla 4.13: Malos actores por pérdidas de producción para cada línea

Equipo MT	Especialidad	LINEA	PÉRDIDA (ADT/AÑO PROMEDIO) [%]
BOMBA 28	Mecánica	SF1	0,75%
CILINDRO 2	Mecánica	SF1	4,43%
REDUCTOR 53	Mecánica	SF2	1,34%
BOMBA 24	Mecánica	SF1	0,59%

BOMBA 105 | Mecánica | SF2 | 1,74%

Posterior a la aplicación de los 5 criterios definidos, es posible clasificar y priorizar los activos en función de su comportamiento de falla e impacto operativo, donde es importante mencionar que una herramienta clave durante el proceso fue el análisis de Jack Knife, el cual permite clasificar los equipos en distintos cuadrantes según su tasa de falla y tiempo medio de reparación.

De esta manera, y en base a lo presentado en el Anexo A, la Tabla 4.14 permite conocer la cantidad de equipos por cuadrante, tal como se muestra a continuación:

Tabla 4.14: Cantidad de equipos por cuadrante en análisis Jack Knife

Cuadrante	Tipo de fallas	Nº de equipos
I	Fallas Agudas y Crónicas	46
II	Fallas Agudas	60
III	Fallas Bajo Control	132
IV	Fallas Crónicas	57
TOTAL		295

De la misma manera, gracias a los costos presentados anteriormente es posible inferir los costos por cuadrante, para lo cual, a modo de resumen, se presenta la Tabla 4.15:

Tabla 4.15: Costos por cuadrante acorde a análisis Jack Knife

Cuadrante	Costos por Cuadrante
Cuadrante 1	\$ 2.199.933.040
Cuadrante 4	\$ 1.975.925.560
Cuadrante 3	\$ 1.266.477.066
Cuadrante 2	\$ 1.053.677.323

De lo anterior es posible inferir que, si bien se concentra aproximadamente el triple de equipos en fallas bajo control en comparación a fallas agudas y crónicas, el costo asociado a estas últimas es prácticamente el doble.

Dicho esto, cabe mencionar que no siempre la cantidad de activos con problemas es el mejor indicador de criticidad, ya que un número reducido de equipos con fallas críticas puede generar un impacto económico, y en casos productivo, muy superior al que representa la mayoría de los equipos con fallas menores. De ahí la importancia de combinar múltiples enfoques de análisis para una priorización más efectiva.

Este tipo de micro conclusiones refuerza la necesidad de realizar análisis FMECA evaluando modos, causas, criticidad y consecuencias de fallas para así designar recursos de forma más estratégica y efectiva.

4.3.4 Análisis y selección de equipos para análisis FMECA

En base a la priorización desarrollada anteriormente para cada uno de los 5 criterios analizados, se seleccionarán los equipos que impliquen, de manera justificada, una representatividad para Planta Santa Fe que conlleva a un análisis FMECA, metodología que permitirá profundizar en los modos de falla del activo, evaluando causas, criticidad y consecuencias, con el fin de proponer una estrategia de mantenimiento eficaz y realista.

Con el fin de una representatividad lo más cercana a la realidad para Planta Santa Fe, es primordial considerar que su segunda línea de producción (SF2) produce 3 veces lo que produce su primera línea (SF1), por tanto, se considerarán, en caso de que aplique, más representativos los equipos de SF2 antes que SF1.

A continuación, las Tablas 4.16, 4.17 y 4.18 presentan los resultados de priorización para los análisis de Pareto por familia, Pareto por equipo para $\lambda \geq 2$ y Jack Knife para los 10 equipos más lejanos a la recta de indisponibilidad, respectivamente.

Tabla 4.16: Priorización de análisis de Pareto por Familia

	Planta SF	SF1	SF2
Bomba	40,5%	25,0%	15,5%
Reductor	31,1%	12,3%	18,8%
Cilindro	10,1%	10,1%	0,0%
Agitador	5,7%	4,6%	1,1%
Ventilador	3,0%	0,8%	2,2%
Colector	2,0%	2,0%	0,0%
Línea	1,7%	1,1%	0,6%
Polín	1,6%	0,4%	1,2%
Lanza	1,6%	1,4%	0,1%
Accionamiento	1,5%	0,2%	1,3%
Estanque	1,3%	0,6%	0,7%

Tabla 4.17: Priorización de análisis de Pareto por Equipo con $\lambda \geq 2$

	Planta SF	SF1	SF2
Bomba	9	5	4
Reductor	7	1	6
Agitador	1		1
Colector	1	1	
Lanza	1	1	
Estanque	1		1

Tabla 4.18: Priorización de análisis de Jack Knife sobre indisponibilidad

Ítem	Equipo para MT	Línea
73	CILINDRO 5	SF1
47	CILINDRO 3	SF1
4	COLECTOR 1	SF1
8	REDUCTOR 4	SF2
13	BOMBA 5	SF1
2	LANZA 1	SF1
7	REDUCTOR 3	SF2
32	BOMBA 14	SF1
52	REDUCTOR 18	SF2
15	ESTANQUE 1	SF2

De esta manera, estableciendo un cruce de información entre las priorizaciones presentadas y la Tabla 4.13, se deja ver que ninguno de los equipos priorizados, tanto por Pareto como por Jack Knife, presenta pérdidas de producción considerables que lo cataloguen como un mal actor.

Es por ello, la Tabla 4.19 resume, por una parte, los equipos en los que conversan las priorizaciones presentadas y, por otra parte, considera los equipos catalogados como malos actores, ambos escenarios ligados a los costos totales de mantenimiento que ha implicado el activo en los más de 7 años de estudio y que, por tanto, implica representatividad para la planta.

Tabla 4.19: Resumen de priorización de posibles equipos para análisis FMECA

	Equipo para MT	Costos	Línea
Pareto y Jack Knife	LANZA 1	\$ 53.109.478	SF1
	COLECTOR 1	\$ 82.883.126	SF1
	REDUCTOR 3	\$ 52.765.239	SF2
	REDUCTOR 4	\$ 215.763.139	SF2
	BOMBA 5	\$ 70.659.293	SF1
	ESTANQUE 1	\$ 22.731.715	SF2
Mal Actor en ámbito productivo	BOMBA 28	\$ 28.073.335	SF1
	CILINDRO 2	\$ 88.033.619	SF1
	REDUCTOR 53	\$ 257.959	SF2
	BOMBA 24	\$ 12.036.745	SF1
	BOMBA 105	\$ 40.995.000	SF2

De esta manera, acorde a la producción de SF2 y al impacto económico presentado, se seleccionan para análisis FMECA sin lugar a duda: “REDUCTOR 4”, “ESTANQUE 1” y “BOMBA 105”. Así mismo, se selecciona un 4° equipo (SF1), donde primordialmente se evalúan costos, cantidad de ejemplares sin estrategia definida y condición de terreno en Planta Santa Fe, punto fundamental bajo el cual se opta por seleccionar el “COLECTOR 1” antes que el “CILINDRO 2”, pese a las pérdidas productivas de este último.

Finalmente, con el propósito de reforzar la elección de equipos para análisis FMECA, fue posible graficar, gracias al modelo de Weibull, y con ello la estimación de los parámetros de forma y escala, la Confiabilidad $R(t)$, Tasa de Falla $\lambda(t)$, Probabilidad Acumulada de Falla $F(t)$ y Densidad de Probabilidad de Falla $f(t)$, lo que deja entre ver el comportamiento estadístico de cada activo frente a una falla.

A continuación, las Figuras 4.8, 4.9, 4.10 y 4.11 presentan las gráficas en el mismo orden en que fueron mencionadas.

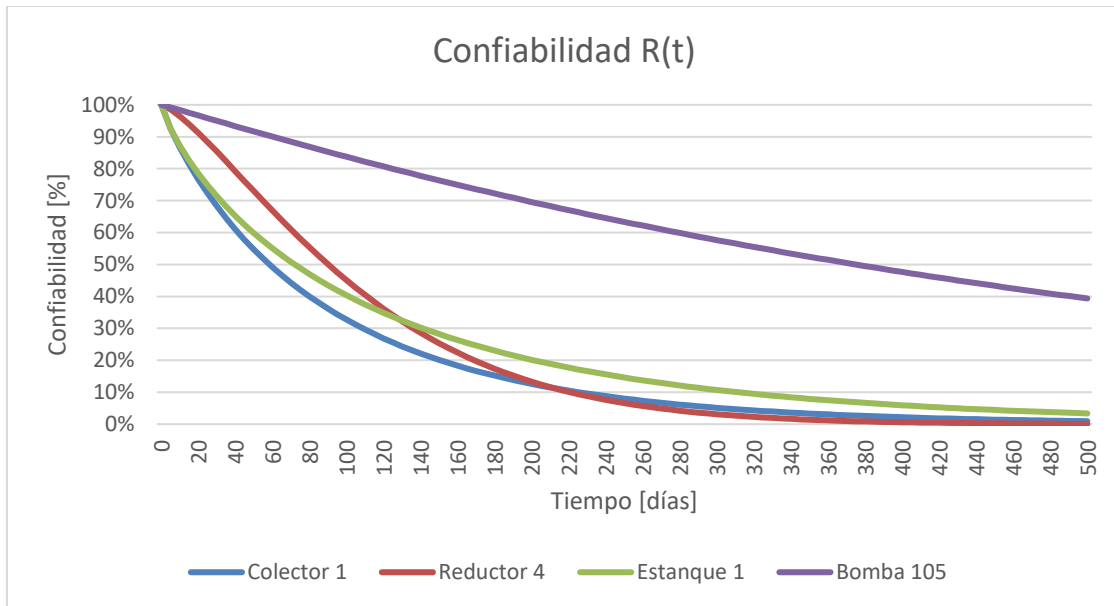


Figura 4.8: Confiabilidad $R(t)$ de equipos seleccionados para análisis FMECA

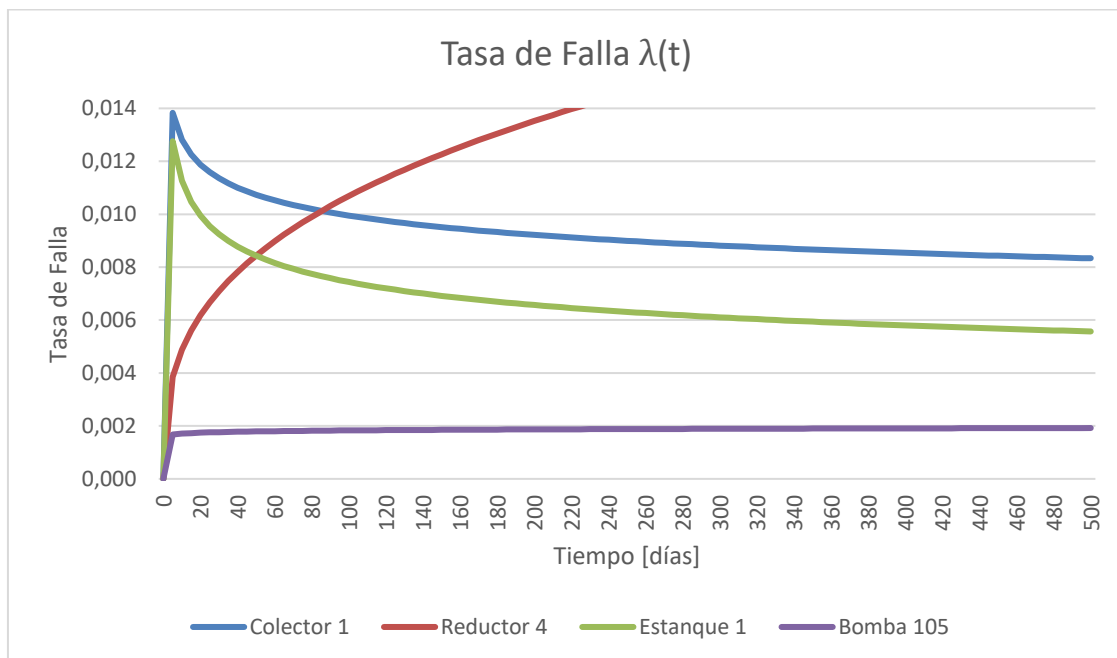


Figura 4.9: Tasa de Falla $\lambda(t)$ de equipos seleccionados para análisis FMECA

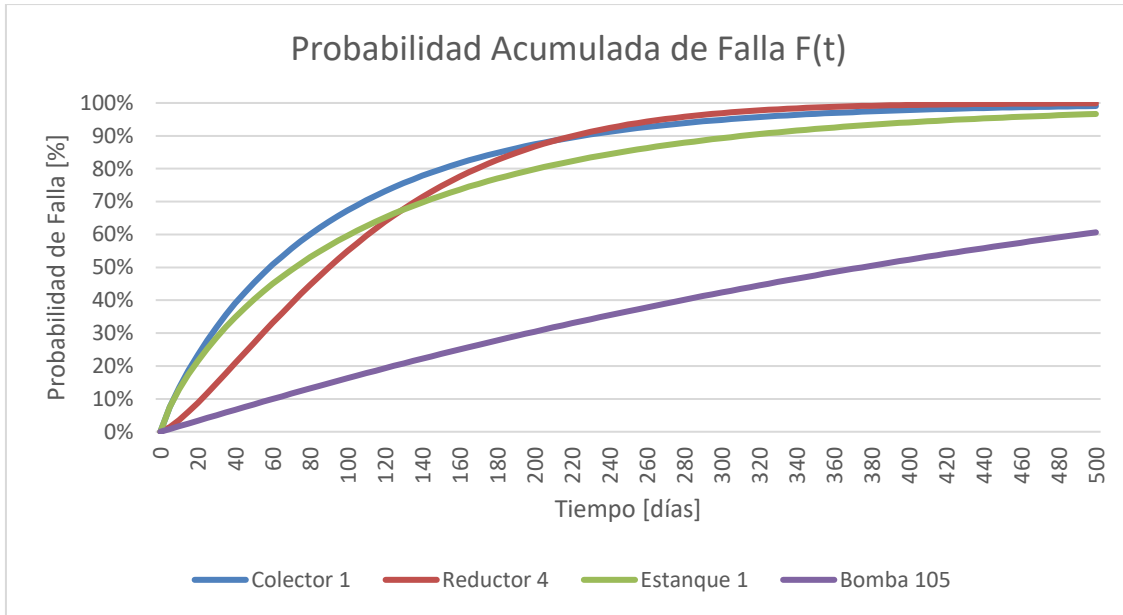


Figura 4.10: Probabilidad Acumulada de Falla $F(t)$ de equipos seleccionados para análisis FMECA

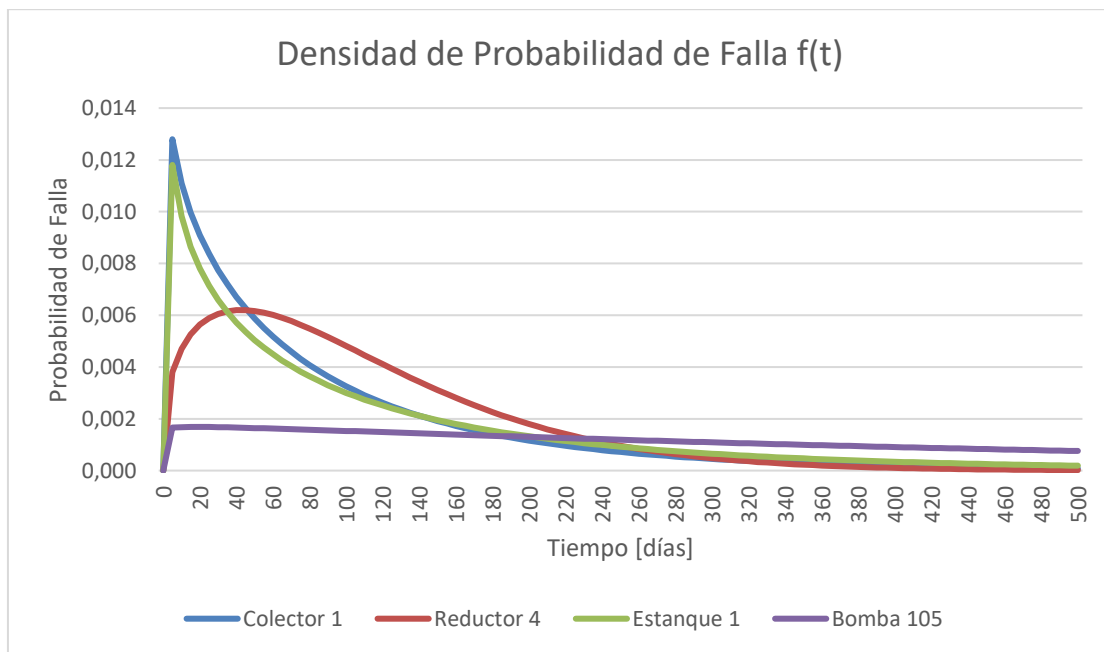


Figura 4.11: Densidad de Probabilidad de Falla $f(t)$ de equipos seleccionados para análisis FMECA

Así mismo, integrar estas curvas permite comprender el comportamiento real de los equipos a lo largo del tiempo y prevenir condiciones de mayor riesgo operativo.

De esta manera, tanto los modelos de Weibull, Pareto y Jack Knife como el impacto económico y productivo, aportaron de manera sólida a la priorización y selección de activos representativos, lo que da paso a que el análisis FMECA tenga enfoque directo en la continuidad operativa y la optimización de recursos.

CAPÍTULO 5: Resultados

El presente capítulo consta del desarrollo y resultados del análisis FMECA aplicado a los equipos priorizados y seleccionados en el capítulo anterior según análisis de confiabilidad acorde a su historial de fallas, producción y costos, lo que conlleva a validar la metodología propuesta, demostrando su efectividad al momento de identificar y analizar activos con una mejora potencial en su gestión operativa.

A continuación, se desarrollarán 4 análisis FMECA, específicamente de los equipos: Colector 1, Reductor 4, Bomba 105 y Estanque 4, donde, gracias a la descarga de avisos y posiciones de estos en el sistema de datos de la compañía [16], fue posible recopilar los diferentes modos, causas y motivos de las distintas fallas dentro de su historial en el tiempo estudiado. A modo de corroborar lo anterior, el Anexo C presenta el modo, causa y motivo de falla más repetitivo por equipo y costo asociado.

Para cada análisis, se identificaron los modos de falla existentes, causas de falla, efectos de estas últimas, se establecieron índices de severidad (S), ocurrencia (O) y detectabilidad (D) con la finalidad de obtener el NPR a modo de plasmar la criticidad del modo de falla en cuestión y, finalmente, se determinó el impacto de cada modo de falla en términos de seguridad, medio ambiente y producción, con tal de lograr definir estrategias de mantenimiento para cada modo de falla del equipo analizado.

En base a lo anterior, los Anexos D, E, F y G presentan los análisis FMECA para el Colector 1, Reductor 4, Bomba 105 y Estanque 4, respectivamente.

De esta manera, la aplicación de análisis FMECA en estos casos no sólo permite validar la solidez del enfoque y la metodología empleada, sino también dar recomendaciones directas que colaboran eficazmente a la toma de decisiones en la gestión tanto de la mantención como de los activos.

Así mismo, el Anexo B presenta tanto la frecuencia de mantenimiento óptima como la oportunidad de intervención para cada equipo, acorde tanto a su MTBF y tasa de falla, como al estándar de frecuencias y oportunidad de mantención de Planta Santa Fe.

Finalmente, y a modo de validar lo realizado durante la presente memoria de título, la Tabla 5.1 estima los parámetros definidos de (1) a (4) para los 4 equipos seleccionados con análisis FMECA.

Tabla 5.1: Estimaciones de KPI para validación

Equipo para MT	MTBF [Días]	MTTR [Horas]	β	η	A	λ
Colector 1	93,21	19,81	0,89	88,24	82%	3,906
Reductor 4	108,72	22,13	1,34	118,42	83%	3,069
Estanque 1	125,66	19,16	0,82	112,57	87%	2,232
Bomba 105	528,68	-	1,03	535,12	-	0,418

En tanto para la futura implementación y evaluación de la efectividad metodológica en Planta Santa Fe, se sugiere evaluar los mismos parámetros estimados junto con los % de Confiabilidad y Disponibilidad definidos en (9) y (10), respectivamente.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

A partir del trabajo realizado durante la presente memoria de título, se obtuvieron diversos resultados que permiten concluir puntos sumamente relevantes con respecto a la gestión de la mantención en equipos críticos. Entre ellos se destaca:

- El desarrollo de una metodología estructurada que logra definir estrategias de mantenimiento integrando impacto económico y productivo, herramientas de confiabilidad y análisis FMECA, lo cual permite una toma de decisiones alineada con la gestión de activos y estándares internos de Planta Santa Fe.
- Una caracterización detallada del comportamiento de falla por equipo, lo cual no tan solo permite visualizar la evolución de la confiabilidad en el tiempo, sino también priorizar equipos de una manera mas estratégica.
- La estimación de KPI's reales, los cuales no solo validan la metodología, sino que establecen parte fundamental para la evaluación futura en Planta Santa Fe.
- La cobertura de aproximadamente el 70% de los equipos mecánicos de criticidad A sin estrategia de mantención definida y con ello del 15 [%] al 16 [%] de la muestra total, esto gracias a la efectiva priorización y selección de equipos.
- A pesar de no formar parte del alcance de la investigación, se determina que el correcto desarrollo de la metodología permite estimar la efectividad de los planes de mantenimiento presentes en la industria, principalmente en relación a las pérdidas de producción asociadas.

Trabajos Futuros

- Implementar metodología en Planta Santa Fe y realizar seguimiento a las estrategias definidas durante una temporada (tiempo entre paradas de planta) con el fin de comparar estimaciones realizadas para evaluar efectividad y con ello la posibilidad de replicar la metodología en otros niveles de criticidad.
- Aplicar estándares mas rigurosos respecto del sistema SAP, ya que si bien es un sistema sumamente provechoso y útil para plantas de celulosa como Santa Fe, bajo percepción propia es una herramienta que actualmente se maneja en un nivel intermedio para el poder que tiene.
- Automatización de análisis y reportes FMECA, ya que gracias a SAP es posible contar con los modos de falla, causas, motivos e impactos en diferentes aristas.

Referencias

- [1] International Organization for Standardization, ISO 14224: Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment, 3rd ed., ISO, 2016.
- [2] International Organization for Standardization, ISO 55001: Asset management — Management systems — Requirements, ISO, 2014.
- [3] L. F. Hincapié Pérez, “Metodología de gestión de mantenimiento desde una perspectiva de Confiabilidad-Disponibilidad-Mantenibilidad (CDM) para aplicación en equipos de Tecnología de la Información (TI),” Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2014.
- [4] O. E. Gordillo Santana y O. A. Sierra Arévalo, “Propuesta de mejora al plan de mantenimiento para los equipos de mayor criticidad en la empresa OSG aplicando la metodología RCM,” Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, 2016.
- [5] L. G. Flores Puma, “Diseñar e implementar un plan de mantenimiento basado en RCM mantenimiento centrado en confiabilidad para equipos críticos en una cementera del sur del país,” Tesis de ingeniería, Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, Perú, 2019.
- [6] O. Cordero y E. Estupiñán, “Propuesta de optimización del mantenimiento de planta minera de cobre Ministro Hales, mediante análisis de confiabilidad, utilizando la metodología FMECA,” Tesis de maestría, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, 2021.
- [7] M. R. Poma Blanco y L. T. Jorquera Ochoa, “Manual didáctico para uso y aplicación de la metodología FMECA, en programas de mantenimiento centrados en confiabilidad,” Tesis de ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, Chile, 2020.
- [8] F. G. De la Cruz Tornero y P. H. Arata Panduro, “Mantenimiento centrado en la confiabilidad para incrementar la disponibilidad en equipos críticos en una planta de producción de harina y aceite de pescado - Callao - 2021,” Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú, 2021.
- [9] J. D. Carmona Londoño, “Análisis de confiabilidad mediante el modelo de Weibull,” Trabajo de grado profesional, Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia, 2023.
- [10] J. D. Aulestia Espinosa y A. F. Guerrero Romero, “Desarrollo de una herramienta informática basada en el método Jack-Knife para el análisis de fallas y costos en flotas de transporte,” Tesis de grado, Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2022.
- [11] F. A. Cabrera Vásquez, “Desarrollo de una estrategia de confiabilidad en planta chancado División Gabriela Mistral – Codelco Chile,” Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Dirección de Empresas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2019.
- [12] G. Barrientos Ríos y C. Canales Cárdenas, Gestión del mantenimiento. Universidad de Concepción, Concepción, Chile, mar. 2024.
- [13] Asociación Española de Normalización, UNE-EN IEC 60812:2018. Análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE y AMFEC), nov. 2018.

- [14] Ministerio de Salud, Chile, Decreto Supremo N.º 43 de 2016. Aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Sustancias Peligrosas, 29 mar. 2016.
- [15] Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, Chile, Decreto Supremo N.º 160 de 2009. Aprueba Reglamento de Seguridad para las Instalaciones y Operaciones de Producción y Refinación, Transporte, Almacenamiento, Distribución y Abastecimiento de Combustibles Líquidos, 7 jul. 2009.
- [16] SAP SE, Soluciones de software empresarial, 2025.
- [17] American Petroleum Institute, API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage, 13.^a ed., mar. 2020.
- [18] American Petroleum Institute, API Standard 653: Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, 5.^a ed., nov. 2014.
- [19] Ministerio de Salud, Chile, Decreto Supremo N.º 10 de 2013. Aprueba Reglamento de Calderas, Autoclaves y Equipos que Utilizan Vapor de Agua, 19 oct. 2013.
- [20] Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, Chile, Decreto Supremo N.º 160 de 2009. Aprueba Reglamento de Seguridad para las Instalaciones y Operaciones de Producción y Refinación, Transporte, Almacenamiento, Distribución y Abastecimiento de Combustibles Líquidos, 7 jul. 2009.
- [21] Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Chile, Decreto Supremo N.º 78 de 2023. Delimita Áreas de Zonas Fronterizas a Resguardar por Parte de las Fuerzas Armadas y de Orden y Seguridad Pública, 24 feb. 2023.

Anexo A: Análisis estadístico mediante Jack Knife

EQUIPO MT	ITEM	MTTR [Horas]	Tasa de falla	MTTR [Años]	$\lambda \bullet$ MTTR [-]	Indisp	Cuadrante
REDUCTOR 1	1	5,36	6,56	0,0006119	0,401%	0,020%	Cuadrante 4
LANZA 1	2	11,75	4,33	0,0013413	0,580%	0,031%	Cuadrante 1
BOMBA 1	3	10,58	4,05	0,0012076	0,489%	0,033%	Cuadrante 4
COLECTOR 1	4	19,81	3,91	0,0022612	0,883%	0,034%	Cuadrante 1
BOMBA 2	5	7,07	3,77	0,0008072	0,304%	0,035%	Cuadrante 4
REDUCTOR 2	6	8,68	3,63	0,0009912	0,360%	0,036%	Cuadrante 4
REDUCTOR 3	7	14,42	3,35	0,0016460	0,551%	0,040%	Cuadrante 1
REDUCTOR 4	8	22,13	3,07	0,0025263	0,776%	0,043%	Cuadrante 1
REDUCTOR 5	9	12,75	3,07	0,0014555	0,447%	0,043%	Cuadrante 1
REDUCTOR 6	10	11,63	2,93	0,0013275	0,389%	0,045%	Cuadrante 1
BOMBA 3	11	15,19	2,65	0,0017343	0,460%	0,050%	Cuadrante 1
BOMBA 4	12	9,86	2,51	0,0011261	0,283%	0,053%	Cuadrante 4
BOMBA 5	13	24,68	2,51	0,0028175	0,708%	0,053%	Cuadrante 1
REDUCTOR 7	14	15,69	2,37	0,0017911	0,425%	0,056%	Cuadrante 1
ESTANQUE 1	15	19,16	2,23	0,0021875	0,488%	0,059%	Cuadrante 1
BOMBA 6	16	15,14	2,23	0,0017280	0,386%	0,059%	Cuadrante 1
AGITADOR 1	17	7,08	2,09	0,0008083	0,169%	0,063%	Cuadrante 4
BOMBA 7	18	9,85	2,09	0,0011244	0,235%	0,063%	Cuadrante 4
BOMBA 8	19	18,77	2,09	0,0021429	0,449%	0,063%	Cuadrante 1
BOMBA 9	20	4,87	2,09	0,0005556	0,116%	0,063%	Cuadrante 4
REDUCTOR 8	21	9,52	1,95	0,0010864	0,212%	0,068%	Cuadrante 4
REDUCTOR 9	22	11,08	1,95	0,0012647	0,247%	0,068%	Cuadrante 4
REDUCTOR 10	23	12,31	1,81	0,0014058	0,255%	0,073%	Cuadrante 1
BOMBA 10	24	3,14	1,81	0,0003584	0,065%	0,073%	Cuadrante 4
BOMBA 11	25	14,27	1,81	0,0016292	0,296%	0,073%	Cuadrante 1
REDUCTOR 11	26	4,83	1,81	0,0005518	0,100%	0,073%	Cuadrante 4
CILINDRO 1	27	10,61	1,81	0,0012111	0,220%	0,073%	Cuadrante 4
BOMBA 12	28	8,23	1,81	0,0009392	0,170%	0,073%	Cuadrante 4
BOMBA 13	29	2,95	1,67	0,0003365	0,056%	0,079%	Cuadrante 4
REDUCTOR 12	30	19,68	1,67	0,0022466	0,376%	0,079%	Cuadrante 1
AGITADOR 2	31	12,78	1,67	0,0014591	0,244%	0,079%	Cuadrante 1
BOMBA 14	32	27,48	1,67	0,0031374	0,525%	0,079%	Cuadrante 1
BOMBA 15	33	3,73	1,67	0,0004255	0,071%	0,079%	Cuadrante 4
BOMBA 16	34	10,13	1,67	0,0011568	0,194%	0,079%	Cuadrante 4
CILINDRO 2	35	22,74	1,67	0,0025956	0,435%	0,079%	Cuadrante 1
REDUCTOR 13	36	10,74	1,67	0,0012255	0,205%	0,079%	Cuadrante 4
BOMBA 17	37	1,65	1,67	0,0001889	0,032%	0,079%	Cuadrante 4
REDUCTOR 14	38	3,73	1,67	0,0004258	0,071%	0,079%	Cuadrante 4
BOMBA 18	39	13,55	1,67	0,0015473	0,259%	0,079%	Cuadrante 1
REDUCTOR 15	40	13,43	1,67	0,0015335	0,257%	0,079%	Cuadrante 1
BOMBA 19	41	14,28	1,53	0,0016296	0,250%	0,086%	Cuadrante 1

AGITADOR 3	42	1,92	1,53	0,0002190	0,034%	0,086%	Cuadrante 4
BOMBA 20	43	8,84	1,53	0,0010088	0,155%	0,086%	Cuadrante 4
BOMBA 21	44	16,36	1,53	0,0018679	0,287%	0,086%	Cuadrante 1
REDUCTOR 16	45	16,38	1,53	0,0018693	0,287%	0,086%	Cuadrante 1
BOMBA 22	46	10,65	1,53	0,0012158	0,187%	0,086%	Cuadrante 4
CILINDRO 3	47	52,25	1,53	0,0059646	0,915%	0,086%	Cuadrante 1
BOMBA 23	48	12,39	1,53	0,0014139	0,217%	0,086%	Cuadrante 1
AGITADOR 4	49	22,24	1,53	0,0025390	0,390%	0,086%	Cuadrante 1
COLECTOR 2	50	17,00	1,53	0,0019402	0,298%	0,086%	Cuadrante 1
REDUCTOR 17	51	1,68	1,53	0,0001912	0,029%	0,086%	Cuadrante 4
REDUCTOR 18	52	29,64	1,53	0,0033841	0,519%	0,086%	Cuadrante 1
BOMBA 24	53	14,97	1,40	0,0017092	0,238%	0,095%	Cuadrante 1
BOMBA 25	54	9,62	1,40	0,0010984	0,153%	0,095%	Cuadrante 4
POLIN 1	55	0,72	1,40	0,0000819	0,011%	0,095%	Cuadrante 4
BOMBA 26	56	11,09	1,40	0,0012657	0,177%	0,095%	Cuadrante 4
BOMBA 27	57	9,91	1,40	0,0011318	0,158%	0,095%	Cuadrante 4
VENTILADOR 1	58	9,33	1,40	0,0010649	0,149%	0,095%	Cuadrante 4
REDUCTOR 19	59	8,01	1,40	0,0009141	0,128%	0,095%	Cuadrante 4
REDUCTOR 20	60	6,80	1,40	0,0007763	0,108%	0,095%	Cuadrante 4
REDUCTOR 21	61	10,16	1,40	0,0011593	0,162%	0,095%	Cuadrante 4
BOMBA 28	62	10,65	1,40	0,0012158	0,170%	0,095%	Cuadrante 4
CILINDRO 4	63	22,32	1,40	0,0025482	0,356%	0,095%	Cuadrante 1
BOMBA 29	64	5,41	1,40	0,0006179	0,086%	0,095%	Cuadrante 4
BOMBA 30	65	22,74	1,26	0,0025962	0,326%	0,105%	Cuadrante 1
BOMBA 31	66	13,82	1,26	0,0015772	0,198%	0,105%	Cuadrante 1
BOMBA 32	67	1,49	1,26	0,0001699	0,021%	0,105%	Cuadrante 4
BOMBA 33	68	25,93	1,26	0,0029600	0,372%	0,105%	Cuadrante 1
BOMBA 34	69	11,47	1,26	0,0013094	0,164%	0,105%	Cuadrante 1
REDUCTOR 22	70	3,00	1,26	0,0003425	0,043%	0,105%	Cuadrante 4
AGITADOR 5	71	21,75	1,26	0,0024824	0,312%	0,105%	Cuadrante 1
REDUCTOR 23	72	10,47	1,26	0,0011955	0,150%	0,105%	Cuadrante 4
CILINDRO 5	73	68,13	1,26	0,0077768	0,977%	0,105%	Cuadrante 1
BOMBA 35	74	9,43	1,26	0,0010769	0,135%	0,105%	Cuadrante 4
BOMBA 36	75	14,71	1,26	0,0016790	0,211%	0,105%	Cuadrante 1
ESTANQUE 2	76	9,45	1,26	0,0010792	0,136%	0,105%	Cuadrante 4
BOMBA 37	77	7,24	1,26	0,0008261	0,104%	0,105%	Cuadrante 4
BOMBA 38	78	9,74	1,26	0,0011124	0,140%	0,105%	Cuadrante 4
CILINDRO 6	79	16,37	1,26	0,0018683	0,235%	0,105%	Cuadrante 1
BOMBA 39	80	18,74	1,26	0,0021395	0,269%	0,105%	Cuadrante 1
REDUCTOR 24	81	4,77	1,26	0,0005447	0,068%	0,105%	Cuadrante 4
REDUCTOR 25	82	5,72	1,26	0,0006526	0,082%	0,105%	Cuadrante 4
ACCIONAMIENTO 1	83	7,82	1,26	0,0008927	0,112%	0,105%	Cuadrante 4
REDUCTOR 26	84	15,77	1,12	0,0018004	0,201%	0,119%	Cuadrante 1
BOMBA 40	85	18,42	1,12	0,0021027	0,235%	0,119%	Cuadrante 1
BOMBA 41	86	25,46	1,12	0,0029061	0,324%	0,119%	Cuadrante 1
VENTILADOR 2	87	11,66	1,12	0,0013311	0,149%	0,119%	Cuadrante 1

BOMBA 42	88	1,27	1,12	0,0001449	0,016%	0,119%	Cuadrante 4
BOMBA 43	89	2,13	1,12	0,0002426	0,027%	0,119%	Cuadrante 4
BOMBA 44	90	10,79	1,12	0,0012312	0,137%	0,119%	Cuadrante 4
REDUCTOR 27	91	18,28	1,12	0,0020862	0,233%	0,119%	Cuadrante 1
BOMBA 45	92	5,23	1,12	0,0005965	0,067%	0,119%	Cuadrante 4
REDUCTOR 28	93	22,47	1,12	0,0025647	0,286%	0,119%	Cuadrante 1
AGITADOR 6	94	3,33	1,12	0,0003800	0,042%	0,119%	Cuadrante 4
BOMBA 46	95	2,64	1,12	0,0003014	0,034%	0,119%	Cuadrante 4
POLIN 2	96	3,48	1,12	0,0003976	0,044%	0,119%	Cuadrante 4
REDUCTOR 29	97	9,78	1,12	0,0011162	0,125%	0,119%	Cuadrante 4
BOMBA 47	98	10,68	1,12	0,0012192	0,136%	0,119%	Cuadrante 4
BOMBA 48	99	7,13	1,12	0,0008143	0,091%	0,119%	Cuadrante 4
BOMBA 49	100	10,48	1,12	0,0011960	0,134%	0,119%	Cuadrante 4
CILINDRO 7	101	1,85	1,12	0,0002112	0,024%	0,119%	Cuadrante 4
REDUCTOR 30	102	13,97	1,12	0,0015944	0,178%	0,119%	Cuadrante 1
REDUCTOR 31	103	0,48	1,12	0,0000552	0,006%	0,119%	Cuadrante 4
ACCIONAMIENTO 2	104	3,80	0,98	0,0004338	0,042%	0,135%	Cuadrante 3
ACCIONAMIENTO 3	105	2,78	0,98	0,0003177	0,031%	0,135%	Cuadrante 3
REDUCTOR 32	106	5,36	0,98	0,0006115	0,060%	0,135%	Cuadrante 3
REDUCTOR 33	107	2,62	0,98	0,0002987	0,029%	0,135%	Cuadrante 3
REDUCTOR 34	108	20,17	0,98	0,0023021	0,225%	0,135%	Cuadrante 2
BOMBA 50	109	59,28	0,98	0,0067675	0,661%	0,135%	Cuadrante 2
BOMBA 51	110	15,48	0,98	0,0017675	0,173%	0,135%	Cuadrante 2
REDUCTOR 35	111	0,67	0,98	0,0000761	0,007%	0,135%	Cuadrante 3
BOMBA 52	112	3,64	0,98	0,0004159	0,041%	0,135%	Cuadrante 3
BOMBA 53	113	0,30	0,98	0,0000342	0,003%	0,135%	Cuadrante 3
CILINDRO 8	114	5,60	0,98	0,0006393	0,062%	0,135%	Cuadrante 3
CILINDRO 9	115	2,28	0,98	0,0002603	0,025%	0,135%	Cuadrante 3
REDUCTOR 36	116	27,22	0,98	0,0031069	0,303%	0,135%	Cuadrante 2
CILINDRO 10	117	7,80	0,98	0,0008904	0,087%	0,135%	Cuadrante 3
CILINDRO 11	118	8,63	0,98	0,0009846	0,096%	0,135%	Cuadrante 3
CILINDRO 12	119	61,94	0,98	0,0070705	0,691%	0,135%	Cuadrante 2
CILINDRO 13	120	1,86	0,98	0,0002123	0,021%	0,135%	Cuadrante 3
BOMBA 54	121	6,45	0,98	0,0007363	0,072%	0,135%	Cuadrante 3
BOMBA 55	122	13,91	0,98	0,0015884	0,155%	0,135%	Cuadrante 2
BOMBA 56	123	3,09	0,98	0,0003523	0,034%	0,135%	Cuadrante 3
BOMBA 57	124	8,34	0,98	0,0009525	0,093%	0,135%	Cuadrante 3
REDUCTOR 37	125	1,86	0,98	0,0002120	0,021%	0,135%	Cuadrante 3
BOMBA 58	126	15,86	0,98	0,0018102	0,177%	0,135%	Cuadrante 2
REDUCTOR 38	127	3,46	0,98	0,0003950	0,039%	0,135%	Cuadrante 3
BOMBA 59	128	1,40	0,98	0,0001598	0,016%	0,135%	Cuadrante 3
REDUCTOR 39	129	6,04	0,98	0,0006898	0,067%	0,135%	Cuadrante 3
BOMBA 60	130	11,95	0,98	0,0013642	0,133%	0,135%	Cuadrante 2
CILINDRO 14	131	3,04	0,98	0,0003474	0,034%	0,135%	Cuadrante 3
CILINDRO 15	132	7,21	0,98	0,0008235	0,080%	0,135%	Cuadrante 3
AGITADOR 7	133	18,35	0,98	0,0020952	0,205%	0,135%	Cuadrante 2

BOMBA 61	134	3,23	0,98	0,0003682	0,036%	0,135%	Cuadrante 3
AGITADOR 8	135	0,00	0,84	0,0000000	0,000%	0,158%	Cuadrante 3
VENTILADOR 3	136	9,33	0,84	0,0010654	0,089%	0,158%	Cuadrante 3
BOMBA 62	137	22,00	0,84	0,0025114	0,210%	0,158%	Cuadrante 2
BOMBA 63	138	10,30	0,84	0,0011758	0,098%	0,158%	Cuadrante 3
BOMBA 64	139	22,80	0,84	0,0026027	0,218%	0,158%	Cuadrante 2
BOMBA 65	140	16,30	0,84	0,0018607	0,156%	0,158%	Cuadrante 2
VENTILADOR 4	141	9,75	0,84	0,0011130	0,093%	0,158%	Cuadrante 3
BOMBA 66	142	11,15	0,84	0,0012728	0,107%	0,158%	Cuadrante 3
LINEA 1	143	18,14	0,84	0,0020708	0,173%	0,158%	Cuadrante 2
BOMBA 67	144	0,97	0,84	0,0001104	0,009%	0,158%	Cuadrante 3
CILINDRO 16	145	0,63	0,84	0,0000718	0,006%	0,158%	Cuadrante 3
REDUCTOR 41	146	5,00	0,84	0,0005708	0,048%	0,158%	Cuadrante 3
BOMBA 68	147	2,93	0,84	0,0003339	0,028%	0,158%	Cuadrante 3
CILINDRO 17	148	4,87	0,84	0,0005556	0,047%	0,158%	Cuadrante 3
BOMBA 69	149	14,49	0,84	0,0016538	0,138%	0,158%	Cuadrante 2
REDUCTOR 42	150	15,48	0,84	0,0017675	0,148%	0,158%	Cuadrante 2
CILINDRO 18	151	80,67	0,84	0,0092085	0,771%	0,158%	Cuadrante 2
REDUCTOR 43	152	105,66	0,84	0,0120613	1,010%	0,158%	Cuadrante 2
AGITADOR 9	153	8,00	0,84	0,0009132	0,076%	0,158%	Cuadrante 3
CILINDRO 19	154	4,82	0,84	0,0005502	0,046%	0,158%	Cuadrante 3
LINEA 2	155	11,36	0,84	0,0012968	0,109%	0,158%	Cuadrante 2
BOMBA 70	156	14,26	0,84	0,0016281	0,136%	0,158%	Cuadrante 2
REDUCTOR 44	157	16,89	0,84	0,0019276	0,161%	0,158%	Cuadrante 2
BOMBA 71	158	13,78	0,84	0,0015725	0,132%	0,158%	Cuadrante 2
REDUCTOR 45	159	13,10	0,84	0,0014954	0,125%	0,158%	Cuadrante 2
REDUCTOR 46	160	18,05	0,84	0,0020605	0,173%	0,158%	Cuadrante 2
POLIN 3	161	18,20	0,84	0,0020776	0,174%	0,158%	Cuadrante 2
REDUCTOR 47	162	3,68	0,84	0,0004195	0,035%	0,158%	Cuadrante 3
CILINDRO 20	163	6,01	0,84	0,0006866	0,057%	0,158%	Cuadrante 3
REDUCTOR 48	164	2,55	0,84	0,0002911	0,024%	0,158%	Cuadrante 3
AGITADOR 10	165	11,05	0,70	0,0012614	0,088%	0,190%	Cuadrante 3
BOMBA 72	166	11,08	0,70	0,0012643	0,088%	0,190%	Cuadrante 3
BOMBA 73	167	6,53	0,70	0,0007458	0,052%	0,190%	Cuadrante 3
AGITADOR 11	168	17,74	0,70	0,0020254	0,141%	0,190%	Cuadrante 2
REDUCTOR 49	169	5,48	0,70	0,0006260	0,044%	0,190%	Cuadrante 3
AGITADOR 12	170	4,94	0,70	0,0005643	0,039%	0,190%	Cuadrante 3
BOMBA 74	171	7,80	0,70	0,0008904	0,062%	0,190%	Cuadrante 3
CILINDRO 21	172	9,68	0,70	0,0011050	0,077%	0,190%	Cuadrante 3
POLIN 4	173	0,00	0,70	0,0000000	0,000%	0,190%	Cuadrante 3
BOMBA 75	174	0,60	0,70	0,0000685	0,005%	0,190%	Cuadrante 3
BOMBA 76	175	16,33	0,70	0,0018645	0,130%	0,190%	Cuadrante 2
BOMBA 77	176	29,01	0,70	0,0033121	0,231%	0,190%	Cuadrante 2
BOMBA 78	177	8,97	0,70	0,0010236	0,071%	0,190%	Cuadrante 3
BOMBA 79	178	16,77	0,70	0,0019140	0,134%	0,190%	Cuadrante 2
REDUCTOR 50	179	0,90	0,70	0,0001027	0,007%	0,190%	Cuadrante 3

VENTILADOR 5	180	9,50	0,70	0,0010845	0,076%	0,190%	Cuadrante 3
BOMBA 80	181	12,42	0,70	0,0014181	0,099%	0,190%	Cuadrante 2
REDUCTOR 51	182	7,64	0,70	0,0008721	0,061%	0,190%	Cuadrante 3
REDUCTOR 52	183	19,27	0,70	0,0021994	0,153%	0,190%	Cuadrante 2
REDUCTOR 53	184	1,13	0,70	0,0001294	0,009%	0,190%	Cuadrante 3
BOMBA 81	185	9,45	0,70	0,0010788	0,075%	0,190%	Cuadrante 3
BOMBA 82	186	10,77	0,70	0,0012291	0,086%	0,190%	Cuadrante 3
REDUCTOR 54	187	26,35	0,70	0,0030080	0,210%	0,190%	Cuadrante 2
BOMBA 83	188	15,12	0,70	0,0017260	0,120%	0,190%	Cuadrante 2
REDUCTOR 55	189	5,82	0,70	0,0006644	0,046%	0,190%	Cuadrante 3
CILINDRO 22	190	5,15	0,70	0,0005879	0,041%	0,190%	Cuadrante 3
REDUCTOR 56	191	24,75	0,70	0,0028253	0,197%	0,190%	Cuadrante 2
REDUCTOR 57	192	5,97	0,70	0,0006811	0,048%	0,190%	Cuadrante 3
CILINDRO 23	193	1,97	0,70	0,0002245	0,016%	0,190%	Cuadrante 3
BOMBA 84	194	3,53	0,70	0,0004033	0,028%	0,190%	Cuadrante 3
REDUCTOR 58	195	5,32	0,70	0,0006073	0,042%	0,190%	Cuadrante 3
REDUCTOR 59	196	8,13	0,70	0,0009285	0,065%	0,190%	Cuadrante 3
COLECTOR 3	197	10,34	0,70	0,0011807	0,082%	0,190%	Cuadrante 3
REDUCTOR 60	198	0,00	0,70	0,0000000	0,000%	0,190%	Cuadrante 3
BOMBA 85	199	18,94	0,70	0,0021626	0,151%	0,190%	Cuadrante 2
BOMBA 86	200	8,34	0,70	0,0009521	0,066%	0,190%	Cuadrante 3
BOMBA 87	201	3,77	0,70	0,0004300	0,030%	0,190%	Cuadrante 3
REDUCTOR 61	202	1,03	0,70	0,0001180	0,008%	0,190%	Cuadrante 3
CILINDRO 24	203	3,80	0,70	0,0004338	0,030%	0,190%	Cuadrante 3
CILINDRO 25	204	6,88	0,70	0,0007854	0,055%	0,190%	Cuadrante 3
CILINDRO 26	205	2,83	0,70	0,0003225	0,022%	0,190%	Cuadrante 3
ACCIONAMIENTO 4	206	2,68	0,56	0,0003054	0,017%	0,237%	Cuadrante 3
AGITADOR 13	207	19,80	0,56	0,0022603	0,126%	0,237%	Cuadrante 2
REDUCTOR 62	208	9,32	0,56	0,0010639	0,059%	0,237%	Cuadrante 3
BOMBA 88	209	7,00	0,56	0,0007991	0,045%	0,237%	Cuadrante 3
BOMBA 89	210	2,25	0,56	0,0002568	0,014%	0,237%	Cuadrante 3
VENTILADOR 6	211	3,70	0,56	0,0004224	0,024%	0,237%	Cuadrante 3
BOMBA 90	212	10,90	0,56	0,0012443	0,069%	0,237%	Cuadrante 3
BOMBA 91	213	8,13	0,56	0,0009285	0,052%	0,237%	Cuadrante 3
BOMBA 92	214	2,78	0,56	0,0003168	0,018%	0,237%	Cuadrante 3
REDUCTOR 63	215	1,01	0,56	0,0001158	0,006%	0,237%	Cuadrante 3
BOMBA 93	216	4,15	0,56	0,0004737	0,026%	0,237%	Cuadrante 3
VENTILADOR 7	217	5,75	0,56	0,0006564	0,037%	0,237%	Cuadrante 3
REDUCTOR 64	218	6,00	0,56	0,0006849	0,038%	0,237%	Cuadrante 3
REDUCTOR 65	219	2,00	0,56	0,0002283	0,013%	0,237%	Cuadrante 3
BOMBA 94	220	26,23	0,56	0,0029947	0,167%	0,237%	Cuadrante 2
AGITADOR 14	221	12,40	0,56	0,0014155	0,079%	0,237%	Cuadrante 2
VENTILADOR 8	222	5,13	0,56	0,0005860	0,033%	0,237%	Cuadrante 3
BOMBA 95	223	4,90	0,56	0,0005594	0,031%	0,237%	Cuadrante 3
REDUCTOR 66	224	3,55	0,56	0,0004053	0,023%	0,237%	Cuadrante 3
VENTILADOR 9	225	25,00	0,56	0,0028539	0,159%	0,237%	Cuadrante 2

BOMBA 96	226	2,90	0,56	0,0003311	0,018%	0,237%	Cuadrante 3
BOMBA 97	227	23,03	0,56	0,0026284	0,147%	0,237%	Cuadrante 2
REDUCTOR 67	228	4,18	0,56	0,0004766	0,027%	0,237%	Cuadrante 3
CILINDRO 27	229	2,10	0,56	0,0002397	0,013%	0,237%	Cuadrante 3
BOMBA 98	230	2,97	0,56	0,0003387	0,019%	0,237%	Cuadrante 3
REDUCTOR 68	231	3,73	0,56	0,0004252	0,024%	0,237%	Cuadrante 3
CILINDRO 28	232	10,63	0,56	0,0012129	0,068%	0,237%	Cuadrante 3
LINEA 3	233	5,26	0,56	0,0006007	0,034%	0,237%	Cuadrante 3
REDUCTOR 69	234	24,13	0,56	0,0027540	0,154%	0,237%	Cuadrante 2
CILINDRO 29	235	3,80	0,56	0,0004338	0,024%	0,237%	Cuadrante 3
REDUCTOR 70	236	7,90	0,56	0,0009018	0,050%	0,237%	Cuadrante 3
BOMBA 99	237	1,20	0,56	0,0001370	0,008%	0,237%	Cuadrante 3
AGITADOR 15	238	9,13	0,56	0,0010426	0,058%	0,237%	Cuadrante 3
ESTANQUE 3	239	16,49	0,56	0,0018819	0,105%	0,237%	Cuadrante 2
REDUCTOR 71	240	2,43	0,42	0,0002768	0,012%	0,316%	Cuadrante 3
VENTILADOR 10	241	0,65	0,42	0,0000742	0,003%	0,316%	Cuadrante 3
CILINDRO 30	242	6,80	0,42	0,0007763	0,032%	0,316%	Cuadrante 3
BOMBA 100	243	8,13	0,42	0,0009285	0,039%	0,316%	Cuadrante 3
AGITADOR 16	244	0,00	0,42	0,0000000	0,000%	0,316%	Cuadrante 3
BOMBA 101	245	14,71	0,42	0,0016794	0,070%	0,316%	Cuadrante 2
LINEA 4	246	13,17	0,42	0,0015030	0,063%	0,316%	Cuadrante 2
CILINDRO 31	247	2,07	0,42	0,0002359	0,010%	0,316%	Cuadrante 3
BOMBA 102	248	83,90	0,42	0,0095776	0,401%	0,316%	Cuadrante 2
LINEA 5	249	3,30	0,42	0,0003767	0,016%	0,316%	Cuadrante 3
BOMBA 103	250	6,34	0,42	0,0007237	0,030%	0,316%	Cuadrante 3
REDUCTOR 72	251	22,00	0,42	0,0025114	0,105%	0,316%	Cuadrante 2
LANZA 2	252	9,47	0,42	0,0010807	0,045%	0,316%	Cuadrante 3
BOMBA 104	253	16,60	0,42	0,0018950	0,079%	0,316%	Cuadrante 2
VENTILADOR 11	254	4,50	0,42	0,0005137	0,022%	0,316%	Cuadrante 3
VENTILADOR 12	255	4,40	0,42	0,0005023	0,021%	0,316%	Cuadrante 3
POLIN 5	256	9,50	0,42	0,0010845	0,045%	0,316%	Cuadrante 3
VENTILADOR 13	257	12,53	0,42	0,0014307	0,060%	0,316%	Cuadrante 2
BOMBA 105	258	6,75	0,42	0,0007705	0,032%	0,316%	Cuadrante 3
BOMBA 106	259	7,68	0,42	0,0008761	0,037%	0,316%	Cuadrante 3
BOMBA 107	260	7,90	0,42	0,0009018	0,038%	0,316%	Cuadrante 3
LINEA 6	261	8,78	0,42	0,0010020	0,042%	0,316%	Cuadrante 3
REDUCTOR 73	262	15,53	0,42	0,0017732	0,074%	0,316%	Cuadrante 2
CILINDRO 32	263	1,75	0,42	0,0001998	0,008%	0,316%	Cuadrante 3
BOMBA 108	264	0,75	0,42	0,0000856	0,004%	0,316%	Cuadrante 3
AGITADOR 17	265	15,47	0,42	0,0017656	0,074%	0,316%	Cuadrante 2
BOMBA 109	266	7,93	0,42	0,0009047	0,038%	0,316%	Cuadrante 3
ACCIONAMIENTO 5	267	6,78	0,42	0,0007734	0,032%	0,316%	Cuadrante 3
REDUCTOR 74	268	0,67	0,42	0,0000761	0,003%	0,316%	Cuadrante 3
LINEA 7	269	17,33	0,42	0,0019787	0,083%	0,316%	Cuadrante 2
BOMBA 110	270	13,93	0,42	0,0015906	0,067%	0,316%	Cuadrante 2
POLIN 6	271	10,00	0,42	0,0011416	0,048%	0,316%	Cuadrante 3

BOMBA 111	272	6,20	0,42	0,0007078	0,030%	0,316%	Cuadrante 3
CILINDRO 33	273	1,80	0,42	0,0002055	0,009%	0,316%	Cuadrante 3
REDUCTOR 75	274	2,00	0,42	0,0002283	0,010%	0,316%	Cuadrante 3
REDUCTOR 76	275	1,75	0,42	0,0001998	0,008%	0,316%	Cuadrante 3
BOMBA 112	276	15,95	0,42	0,0018208	0,076%	0,316%	Cuadrante 2
BOMBA 113	277	1,08	0,42	0,0001237	0,005%	0,316%	Cuadrante 3
REDUCTOR 77	278	8,30	0,42	0,0009475	0,040%	0,316%	Cuadrante 3
BOMBA 114	279	17,80	0,42	0,0020320	0,085%	0,316%	Cuadrante 2
VENTILADOR 14	280	5,93	0,42	0,0006773	0,028%	0,316%	Cuadrante 3
AGITADOR 18	281	29,53	0,42	0,0033714	0,141%	0,316%	Cuadrante 2
REDUCTOR 78	282	1,00	0,42	0,0001142	0,005%	0,316%	Cuadrante 3
AGITADOR 19	283	6,78	0,42	0,0007734	0,032%	0,316%	Cuadrante 3
BOMBA 115	284	3,25	0,42	0,0003710	0,016%	0,316%	Cuadrante 3
REDUCTOR 79	285	14,55	0,42	0,0016610	0,070%	0,316%	Cuadrante 2
CILINDRO 34	286	4,75	0,42	0,0005422	0,023%	0,316%	Cuadrante 3
REDUCTOR 80	287	40,00	0,42	0,0045662	0,191%	0,316%	Cuadrante 2
LINEA 9	288	2,25	0,42	0,0002568	0,011%	0,316%	Cuadrante 3
ACCIONAMIENTO 6	289	6,17	0,42	0,0007040	0,029%	0,316%	Cuadrante 3
REDUCTOR 81	290	13,80	0,42	0,0015753	0,066%	0,316%	Cuadrante 2
REDUCTOR 82	291	0,00	0,42	0,0000000	0,000%	0,316%	Cuadrante 3
CILINDRO 35	292	1,57	0,42	0,0001788	0,007%	0,316%	Cuadrante 3
REDUCTOR 83	293	0,00	0,42	0,0000000	0,000%	0,316%	Cuadrante 3
CILINDRO 36	294	11,93	0,42	0,0013623	0,057%	0,316%	Cuadrante 2
LINEA 10	295	18,15	0,42	0,0020719	0,087%	0,316%	Cuadrante 2
REDUCTOR 84	296	26,14	0,42	0,0029840	0,125%	0,316%	Cuadrante 2
PROMEDIO			1,029	0,001285	0,132%		

Mantenibilidad - naranjo			Tasa de Falla - verde		
x	0,35	6,8	x	1,029	1,029
y	0,001285	0,00128	y	0,00002	0,02

Anexo B: Frecuencia óptima de plan de mantenimiento y oportunidad CMPC

EQUIPO PARA MT	MTBF [Días]	Tasa de falla [1/año]	Frecuencia Plan Mant	Oportunidad Preventiva
REDUCTOR 1	55,57	6,558139535	45 DIAS	Parada Programada
LANZA 1	81,82	4,325581395	2 MESES	Parada Programada
BOMBA 1	86,85	4,046511628	2 MESES	Parada Programada
COLECTOR 1	93,21	3,906976744	3 MESES	Parada Programada
BOMBA 2	93,82	3,76744186	3 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 2	101,09	3,627906977	3 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 3	107,68	3,348837209	3 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 4	108,72	3,069767442	3 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 5	112,64	3,069767442	3 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 6	113,94	2,930232558	3 MESES	Parada Programada
BOMBA 3	136,44	2,651162791	4 MESES	Parada Programada
BOMBA 4	142,23	2,511627907	4 MESES	Parada Programada
BOMBA 5	145,04	2,511627907	4 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 7	152,22	2,372093023	4 MESES	Parada Programada
ESTANQUE 1	125,66	2,23255814	4 MESES	Parada Programada
BOMBA 6	163,95	2,23255814	4 MESES	Parada Programada
AGITADOR 1	162,93	2,093023256	4 MESES	Parada Programada
BOMBA 7	166,33	2,093023256	4 MESES	Parada Programada
BOMBA 8	167,04	2,093023256	4 MESES	Parada Programada
BOMBA 9	174,35	2,093023256	4 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 8	178,22	1,953488372	4 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 9	180,27	1,953488372	6 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 10	82,34	1,813953488	2 MESES	Parada Programada
BOMBA 10	140,95	1,813953488	4 MESES	Parada Programada
BOMBA 11	159,56	1,813953488	4 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 11	182,79	1,813953488	6 MESES	Parada Programada
CILINDRO 1	190,89	1,813953488	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 12	195,55	1,813953488	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 13	121,25	1,674418605	4 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 12	200,51	1,674418605	6 MESES	Parada Programada
AGITADOR 2	201,34	1,674418605	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 14	203,73	1,674418605	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 15	204,99	1,674418605	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 16	207,69	1,674418605	6 MESES	Parada Programada
CILINDRO 2	207,93	1,674418605	6 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 13	209,4	1,674418605	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 17	209,88	1,674418605	6 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 14	210,38	1,674418605	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 18	214,03	1,674418605	6 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 15	214,85	1,674418605	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 19	169,68	1,534883721	4 MESES	Parada Programada

AGITADOR 3	184,57	1,534883721	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 20	188,08	1,534883721	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 21	189,73	1,534883721	6 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 16	208,04	1,534883721	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 22	213,73	1,534883721	6 MESES	Parada Programada
CILINDRO 3	221,2	1,534883721	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 23	221,84	1,534883721	6 MESES	Parada Programada
AGITADOR 4	222,85	1,534883721	6 MESES	Parada Programada
COLECTOR 2	229,02	1,534883721	6 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 17	231,33	1,534883721	6 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 18	233,06	1,534883721	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 24	210,95	1,395348837	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 25	228,71	1,395348837	6 MESES	Parada Programada
POLIN 1	235,47	1,395348837	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 26	237,9	1,395348837	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 27	252,37	1,395348837	8 MESES	Parada Programada
VENTILADOR 1	253,65	1,395348837	8 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 19	256,37	1,395348837	8 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 20	256,6	1,395348837	8 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 21	258,08	1,395348837	8 MESES	Parada Programada
BOMBA 28	258,93	1,395348837	8 MESES	Parada Programada
CILINDRO 4	260,86	1,395348837	8 MESES	Parada Programada
BOMBA 29	262,22	1,395348837	8 MESES	Parada Programada
BOMBA 30	194,62	1,255813953	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 31	225,05	1,255813953	6 MESES	Parada Programada
BOMBA 32	253,02	1,255813953	8 MESES	Parada Programada
BOMBA 33	253,95	1,255813953	8 MESES	Parada Programada
BOMBA 34	255,8	1,255813953	8 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 22	263,07	1,255813953	8 MESES	Parada Programada
AGITADOR 5	265,92	1,255813953	8 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 23	270,52	1,255813953	9 MESES	Parada Programada
CILINDRO 5	272	1,255813953	9 MESES	Parada Programada
BOMBA 35	278,53	1,255813953	9 MESES	Parada Programada
BOMBA 36	279,85	1,255813953	9 MESES	Parada Programada
ESTANQUE 2	280,87	1,255813953	9 MESES	Parada Programada
BOMBA 37	280,93	1,255813953	9 MESES	Parada Programada
BOMBA 38	281,33	1,255813953	9 MESES	Parada Programada
CILINDRO 6	283,84	1,255813953	9 MESES	Parada Programada
BOMBA 39	284,74	1,255813953	9 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 24	285,76	1,255813953	9 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 25	288,52	1,255813953	9 MESES	Parada Programada
ACCIONAMIENTO 1	290,11	1,255813953	9 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 26	247,65	1,11627907	8 MESES	Parada Programada
BOMBA 40	249,75	1,11627907	8 MESES	Parada Programada
BOMBA 41	255,13	1,11627907	8 MESES	Parada Programada
VENTILADOR 2	264,8	1,11627907	8 MESES	Parada Programada

BOMBA 42	285,77	1,11627907	9 MESES	Parada Programada
BOMBA 43	291,69	1,11627907	9 MESES	Parada Programada
BOMBA 44	295,9	1,11627907	9 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 27	296,21	1,11627907	9 MESES	Parada Programada
BOMBA 45	296,57	1,11627907	9 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 28	301,95	1,11627907	10 MESES	Parada Programada
AGITADOR 6	302,25	1,11627907	10 MESES	Parada Programada
BOMBA 46	307,56	1,11627907	10 MESES	Parada Programada
POLIN 2	307,66	1,11627907	10 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 29	308,54	1,11627907	10 MESES	Parada Programada
BOMBA 47	311,57	1,11627907	10 MESES	Parada Programada
BOMBA 48	311,73	1,11627907	10 MESES	Parada Programada
BOMBA 49	311,75	1,11627907	10 MESES	Parada Programada
CILINDRO 7	312,66	1,11627907	10 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 30	323,75	1,11627907	10 MESES	Parada Programada
REDUCTOR 31	326,61	1,11627907	10 MESES	Parada Programada
ACCIONAMIENTO 2	235,79	0,976744186	6 MESES	Parada General de Planta
ACCIONAMIENTO 3	238,83	0,976744186	6 MESES	Parada General de Planta
REDUCTOR 32	271,39	0,976744186	9 MESES	Parada General de Planta
REDUCTOR 33	277,61	0,976744186	9 MESES	Parada General de Planta
REDUCTOR 34	282,69	0,976744186	9 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 50	292,33	0,976744186	9 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 51	301,34	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
REDUCTOR 35	303,96	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 52	311,73	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 53	314,14	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
CILINDRO 8	314,87	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
CILINDRO 9	317,45	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
REDUCTOR 36	336,48	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
CILINDRO 10	340,87	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
CILINDRO 11	350,18	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
CILINDRO 12	351,62	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
CILINDRO 13	351,78	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 54	352,49	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 55	352,86	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 56	357,15	0,976744186	10 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 57	361,05	0,976744186	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 37	362,81	0,976744186	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 58	364,83	0,976744186	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 38	369,81	0,976744186	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 59	369,93	0,976744186	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 39	371,53	0,976744186	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 60	373,09	0,976744186	1 AÑO	Parada General de Planta
CILINDRO 14	373,84	0,976744186	1 AÑO	Parada General de Planta
CILINDRO 15	377,77	0,976744186	1 AÑO	Parada General de Planta
AGITADOR 7	395,89	0,976744186	1 AÑO	Parada General de Planta

BOMBA 61	397,53	0,976744186	1 AÑO	Parada General de Planta
AGITADOR 8	146,88	0,837209302	4 MESES	Parada General de Planta
VENTILADOR 3	151,6	0,837209302	4 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 62	272,25	0,837209302	9 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 63	284,53	0,837209302	9 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 64	294,24	0,837209302	9 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 65	295,54	0,837209302	9 MESES	Parada General de Planta
VENTILADOR 4	317,32	0,837209302	10 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 66	319,75	0,837209302	10 MESES	Parada General de Planta
LINEA 1	329,64	0,837209302	10 MESES	Parada General de Planta
REDUCTOR 40	333,26	0,837209302	10 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 67	360,02	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
CILINDRO 16	362,02	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 41	363,01	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 68	366,53	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
CILINDRO 17	381,01	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 69	395,71	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 42	395,72	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
CILINDRO 18	397,59	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 43	397,71	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
AGITADOR 9	410,89	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
CILINDRO 19	413,24	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
LINEA 2	413,88	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 70	414,77	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 44	418,78	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 71	422,6	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 45	426,3	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 46	427,9	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
POLIN 3	428,87	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 47	431,09	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
CILINDRO 20	432,62	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 48	437,79	0,837209302	1 AÑO	Parada General de Planta
AGITADOR 10	164,49	0,697674419	4 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 72	207,66	0,697674419	6 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 73	252,36	0,697674419	8 MESES	Parada General de Planta
AGITADOR 11	257,68	0,697674419	8 MESES	Parada General de Planta
REDUCTOR 49	268,41	0,697674419	8 MESES	Parada General de Planta
AGITADOR 12	276,67	0,697674419	9 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 74	316,95	0,697674419	10 MESES	Parada General de Planta
CILINDRO 21	321,19	0,697674419	10 MESES	Parada General de Planta
POLIN 4	324,54	0,697674419	10 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 75	373,44	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 76	383,91	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 77	415,5	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 78	426,6	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 79	428,29	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta

REDUCTOR 50	433,09	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
VENTILADOR 5	442,9	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 80	446,6	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 51	454,94	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 52	456,49	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 53	468,32	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 81	469,92	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 82	472,18	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 54	477,43	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 83	479,39	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 55	479,44	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
CILINDRO 22	491,4	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 56	492,26	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 57	497,73	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
CILINDRO 23	499	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 84	501,95	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 58	507,29	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 59	512,69	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
COLECTOR 3	514,15	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 60	514,67	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 85	516,66	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 86	520,61	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 87	521,1	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 61	521,6	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
CILINDRO 24	524,31	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
CILINDRO 25	537,57	0,697674419	1 AÑO	Parada General de Planta
CILINDRO 26	614,78	0,697674419	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
ACCIONAMIENTO 4	305,19	0,558139535	10 MESES	Parada General de Planta
AGITADOR 13	310,73	0,558139535	10 MESES	Parada General de Planta
REDUCTOR 62	333,07	0,558139535	10 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 88	357,83	0,558139535	10 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 89	395,52	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
VENTILADOR 6	399,42	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 90	412,69	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 91	440,06	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 92	447,12	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 63	448,96	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 93	451,38	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
VENTILADOR 7	465,25	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 64	509,12	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 65	514,16	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 94	514,94	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
AGITADOR 14	533,15	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
VENTILADOR 8	537,33	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 95	538,72	0,558139535	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 66	540,26	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta

VENTILADOR 9	559,11	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
BOMBA 96	561,35	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
BOMBA 97	573,97	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 67	583,97	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
CILINDRO 27	607,08	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
BOMBA 98	610,33	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 68	618,14	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
CILINDRO 28	620,19	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
LINEA 3	633,82	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 69	634,44	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
CILINDRO 29	640,63	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 70	641,53	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
BOMBA 99	645,64	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
AGITADOR 15	646,82	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
ESTANQUE 3	658,63	0,558139535	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 71	151,89	0,418604651	4 MESES	Parada General de Planta
VENTILADOR 10	157,66	0,418604651	4 MESES	Parada General de Planta
CILINDRO 30	191,76	0,418604651	6 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 100	259,2	0,418604651	8 MESES	Parada General de Planta
AGITADOR 16	264,63	0,418604651	8 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 101	277,97	0,418604651	9 MESES	Parada General de Planta
LINEA 4	293,55	0,418604651	9 MESES	Parada General de Planta
CILINDRO 31	326	0,418604651	10 MESES	Parada General de Planta
BOMBA 102	348,24	0,418604651	10 MESES	Parada General de Planta
LINEA 5	391,02	0,418604651	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 103	411,29	0,418604651	1 AÑO	Parada General de Planta
REDUCTOR 72	412,71	0,418604651	1 AÑO	Parada General de Planta
LANZA 2	444,79	0,418604651	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 104	460,55	0,418604651	1 AÑO	Parada General de Planta
VENTILADOR 11	495,29	0,418604651	1 AÑO	Parada General de Planta
VENTILADOR 12	517,16	0,418604651	1 AÑO	Parada General de Planta
POLIN 5	519,51	0,418604651	1 AÑO	Parada General de Planta
VENTILADOR 13	526,1	0,418604651	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 105	528,68	0,418604651	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 106	529,73	0,418604651	1 AÑO	Parada General de Planta
BOMBA 107	530,66	0,418604651	1 AÑO	Parada General de Planta
LINEA 6	540,42	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 73	548,82	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
CILINDRO 32	569,97	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
BOMBA 108	577,43	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
AGITADOR 17	614,05	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
BOMBA 109	620,79	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
ACCIONAMIENTO 5	623,62	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 74	640,68	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
LINEA 7	648	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
BOMBA 110	688,71	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta

POLIN 6	694,48	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
BOMBA 111	695,72	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
CILINDRO 33	714,85	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 75	721,83	0,418604651	1.5 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 76	733,44	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
BOMBA 112	746,07	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
BOMBA 113	764,89	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 77	767,11	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
BOMBA 114	768,95	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
VENTILADOR 14	776,1	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
AGITADOR 18	782,43	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
LINEA 8	795,84	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 78	800,42	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
AGITADOR 19	821,61	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
BOMBA 115	822,27	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 79	824,51	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
CILINDRO 34	832,94	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 80	847,69	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
LINEA 9	849,51	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
ACCIONAMIENTO 6	850,53	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 81	852,74	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 82	854,79	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
CILINDRO 35	855,53	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 83	864,3	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
CILINDRO 36	867,57	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
LINEA 10	873,26	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta
REDUCTOR 84	1077,21	0,418604651	2 AÑOS	Parada General de Planta

Anexo C: Componente, modo de falla y motivo con mayor repetitividad por equipo y sus costos de mantención asociados por falla

EQUIPO PARA MT	Componente	Modo de Falla	Motivo	Costos Totales
REDUCTOR 1	RETEN	FUGA DE ACEITE	FISURA	\$ 62.068.870
LANZA 1	CILINDRO	RUIDO	ROTURA	\$ 53.109.478
BOMBA 1	RODAMIENTO	VIBRACION	SOLTURA	\$ 294.697.870
COLECTOR 1	ENTRADA DE VAPOR	FUGA DE FLUIDO	FISURA	\$ 82.883.126
BOMBA 2	INDICADOR	DESGASTE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 180.773.742
REDUCTOR 2	BASE	VIBRACION	DESGASTE EXCESIVO	\$ 35.915.606
REDUCTOR 3	BASE	VIBRACION	DESGASTE EXCESIVO	\$ 52.765.239
REDUCTOR 4	ENGRANAJE	VIBRACION	JUEGO EXCESIVO	\$ 215.763.139
REDUCTOR 5	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 12.740.901
REDUCTOR 6	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 170.395.050
BOMBA 3	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	DESALINEAMINT O	\$ 93.335.952
BOMBA 4	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	CORROSION	\$ 134.597.570
BOMBA 5	SELLO MECANICO	FUGA DE AGUA	DESGASTE EXCESIVO	\$ 70.659.293
REDUCTOR 7	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON AGUA	DESGASTE EXCESIVO	\$ 70.347.564
ESTANQUE 1	CAÑERIAS	FUGA FLUIDOS	OBSTRUCCION	\$ 22.731.715
BOMBA 6	SELLO MECANICO	TEMPERATURA	ROTURA	\$ 46.590.190
AGITADOR 1	ESTRUCTURA	PERDIDA DE CENTRADO	CORROSION	\$ 1.102.407
BOMBA 7	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	ROTURA	\$ 42.884.463
BOMBA 8				\$ 210.499.763
BOMBA 9	IMPULSOR	FLUJO ESCASO	QUEBRADURA	\$ 59.593.913
REDUCTOR 8	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON AGUA	DESGASTE EXCESIVO	\$ 15.733.819
REDUCTOR 9	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 4.843.413
REDUCTOR 10	CARCASA	PERDIDA DE AJUSTE	DESTRUCCION	\$ 54.041.457
BOMBA 10	CAÑERIA	PERDIDA DE PRESION	ROTURA	\$ 9.291.843
BOMBA 11	RODAMIENTO	CONSUMO EXCESIVO DE ENERGIA	SOBRECARGA	\$ 11.816.798

REDUCTOR 11	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON AGUA	DESGASTE EXCESIVO	\$ -
CILINDRO 1	RODAMIENTO	VIBRACION	FISURA	\$ 22.795.657
BOMBA 12	CAÑERIA	TEMPERATURA	DESGASTE EXCESIVO	\$ 35.237.849
BOMBA 13	IMPULSOR	FUGA DE FLUIDO	ROTURA	\$ 25.902.347
REDUCTOR 12	FILTRO	CONTAMINACION CON AGUA	CORROSION	\$ 59.086.198
AGITADOR 2	ACOPLAMIENTO	TRABAMIENTO	DESTRUCCION	\$ 61.314.698
BOMBA 14	BASE	VIBRACION	CORROSION	\$ 9.153.525
BOMBA 15	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	DESALINEAMINT O	\$ 17.748.990
BOMBA 16	EJE	FUGA DE ACEITE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 21.705.082
CILINDRO 2	CAÑERIA	FUGA DE AGUA	CORROSION	\$ 88.033.619
REDUCTOR 13	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESALINEAMIENT O	\$ 7.524.313
BOMBA 17	CORREA EN V	PERDIDA DE TRACCION	SOLTURA	\$ 1.824.712
REDUCTOR 14	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON AGUA	DESGASTE EXCESIVO	\$ 5.299.391
BOMBA 18	FLANGE	FUGA DE FLUIDO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 61.230.811
REDUCTOR 15	ACOPLAMIENTO	PERDIDA DE AJUSTE	DESALINEAMIENT O	\$ 7.969.967
BOMBA 19	CARCASA	PERDIDA DE AJUSTE	EXCENRICIDAD	\$ 7.356.002
AGITADOR 3	BASTIDOR	PERDIDA DE CENTRADO	QUEBRADURA	\$ 2.877.149
BOMBA 20	ACOPLAMIENTO	PERDIDA DE PRESION	MANGUERA ROTA	\$ 37.849.197
BOMBA 21	CARCASA	FUGA DE FLUIDO	QUEBRADURA	\$ 44.674.638
REDUCTOR 16	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON AGUA	AGRIPAMIENTO	\$ 11.236.714
BOMBA 22	RODAMIENTO	TEMPERATURA	FALLA DE LUBRICACION	\$ 633.886
CILINDRO 3	CAÑERIA	PERDIDA DE PRESION	DESBALANCEO	\$ 123.823.862
BOMBA 23	RODAMIENTO	VIBRACION	SOLTURA	\$ 19.683.392
AGITADOR 4	ESTRUCTURA	FUGA DE FLUIDO	ROTURA	\$ 15.214.937
COLECTOR 2	SALIDA DE VAPOR	PRESENCIA DE FUGAS	ROTURA	\$ 6.242.448
REDUCTOR 17	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 7.091.606
REDUCTOR 18	RETEN	MENOR TORQUE	SOLTURA	\$ 18.680.049
BOMBA 24	IMPULSOR	TRABAMIENTO	ROTURA	\$ 12.036.745
BOMBA 25				\$ 109.543.068
POLIN 1	DESCANSO	TRABAMIENTO	FALLA DE LUBRICACION	\$ 3.278.103

BOMBA 26	RODAMIENTO	VIBRACION	SOLTURA	\$ 72.661.287
BOMBA 27	RODAMIENTO	VIBRACION	SOLTURA	\$ 22.718.400
VENTILADOR 1	CORREA	VIBRACION	ROTURA	\$ 314.449
REDUCTOR 19	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 10.154.208
REDUCTOR 20	EJE	FUGA DE ACEITE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 7.099.186
REDUCTOR 21	ENGRANAJE	PERDIDA DE AJUSTE	JUEGO EXCESIVO	\$ 5.614.410
BOMBA 28	RODAMIENTO	VIBRACION	DESGASTE EXCESIVO	\$ 28.073.335
CILINDRO 4	CABEZAL	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 17.104.426
BOMBA 29	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	DESALINEAMINT O	\$ 45.561.141
BOMBA 30	IMPULSOR	PERDIDA DE PRESION	DESGASTE EXCESIVO	\$ 58.067.957
BOMBA 31	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	FISURA	\$ 17.878.864
BOMBA 32	FLANGE	FUGA DE FLUIDO	ROTURA	\$ 13.441.692
BOMBA 33	CAÑERIA	PERDIDA DE AJUSTE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 51.112.357
BOMBA 34	VALVULA	FUGA DE FLUIDO	FISURA	\$ 11.570.626
REDUCTOR 22	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 7.114.900
AGITADOR 5	CORREA	PERDIDA DE CENTRADO	SOLTURA	\$ 30.168.088
REDUCTOR 23	RODAMIENTO	PERDIDA DE AJUSTE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 10.828.222
CILINDRO 5	CAÑERIA	FUGA DE AGUA	CORROSION	\$ 87.845.889
BOMBA 35	RODAMIENTO	VIBRACION	SOLTURA	\$ 8.474.537
BOMBA 36	CARCASA	PERDIDA DE AJUSTE	QUEBRADURA	\$ 5.857.665
ESTANQUE 2	CUERPO DEL ESTANQUE	FUGA FLUIDOS	DESGASTE EXCESIVO	\$ 17.156.505
BOMBA 37	SELLO MECANICO	FUGA DE FLUIDO	ROTURA	\$ 23.974.078
BOMBA 38	IMPULSOR	FLUJO ESCASO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 232.520.053
CILINDRO 6	MANGUERA	FUGA DE AGUA	FISURA	\$ 21.156.187
BOMBA 39	IMPULSOR	PERDIDA DE PRESION	DESGASTE EXCESIVO	\$ 19.770.845
REDUCTOR 24	ENGRANAJE	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 9.167.711
REDUCTOR 25	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 820.614
ACCIONAMIENTO 1	ACOPLAMIENTO	RUIDO	TORCEDURA	\$ 137.329.336
REDUCTOR 26	EJE	VIBRACION	DESGASTE EXCESIVO	\$ 5.085.294
BOMBA 40	CARCASA	FUGA DE FLUIDO	SOLTURA	\$ 13.663.305
BOMBA 41				\$ 132.617.903

VENTILADOR 2	VALVULA	PERDIDA DE AJUSTE	DESTRUCCION	\$ 1.479.457
BOMBA 42	FLANGE	PERDIDA DE AJUSTE	JUEGO EXCESIVO	\$ 14.205.466
BOMBA 43	RODAMIENTO	TRABAMIENTO	OBSTRUCCION	\$ 1.260.912
BOMBA 44	SELLO MECANICO	FUGA DE FLUIDO	ROTURA	\$ 4.280.195
REDUCTOR 27	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ -
BOMBA 45	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	ROTURA	\$ 15.887.352
REDUCTOR 28	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 8.320.906
AGITADOR 6	DIFUSOR	TRABAMIENTO	SOBRECARGA	\$ 18.673.280
BOMBA 46	CAÑERIA	FUGA DE ACEITE	ROTURA	\$ 35.321.666
POLIN 2	RODAMIENTO	PERDIDA DE CENTRADO	EXCENRICIDAD	\$ 1.652.884
REDUCTOR 29	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 6.694.989
BOMBA 47				\$ 13.250.763
BOMBA 48	RODAMIENTO	PERDIDA DE AJUSTE	DESALINEAMINT O	\$ 8.291.719
BOMBA 49	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	DESALINEAMINT O	\$ 31.540.117
CILINDRO 7	MANTO	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 18.755.759
REDUCTOR 30	EJE	PERDIDA DE AJUSTE	JUEGO EXCESIVO	\$ 4.816.001
REDUCTOR 31	BASE	MENOR TORQUE	APRIETE EXCESIVO	\$ 12.271.528
ACCIONAMIENTO 2	ELEMENTO FILTRO	ACEITE CONTAMINADO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 4.240.972
ACCIONAMIENTO 3	ELEMENTO FILTRO	ACEITE CONTAMINADO	FILTRO TAPADO	\$ 384.179
REDUCTOR 32	RODAMIENTO	RUIDO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 32.609.174
REDUCTOR 33	RODAMIENTO	PERDIDA DE AJUSTE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 9.731.467
REDUCTOR 34	FILTRO	CONTAMINACION CON AGUA	CORROSION	\$ 10.469.738
BOMBA 50	EJE	PERDIDA DE AJUSTE	ROZAMIENTO	\$ 14.470.573
BOMBA 51	RODAMIENTO	VIBRACION	SOLTURA	\$ 28.852.613
REDUCTOR 35	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 4.944.971
BOMBA 52	ACOPLAMIENTO	PERDIDA DE AJUSTE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 7.248.489
BOMBA 53	IMPULSOR	FLUJO ESCASO	ROTURA	\$ 5.996.707
CILINDRO 8	RODAMIENTO	VIBRACION	AGRIPAMIENTO	\$ 18.833.567
CILINDRO 9	CABEZAL	FUGA DE AGUA	FISURA	\$ 9.006.911
REDUCTOR 36	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON AGUA	JUEGO EXCESIVO	\$ 8.634.857

CILINDRO 10	RODAMIENTO	VIBRACION	ROZAMIENTO	\$ 5.769.173
CILINDRO 11	FLANGE	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 19.721.969
CILINDRO 12	CAÑERIA	TEMPERATURA	ROTURA	\$ 127.030.307
CILINDRO 13	CAÑERIA	FUGA DE AGUA	CORROSION	\$ 17.067.219
BOMBA 54	FLANGE	FUGA DE FLUIDO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 17.958.709
BOMBA 55	RODAMIENTO	PERDIDA DE AJUSTE	SOLTURA	\$ 18.765.913
BOMBA 56	ANILLO	VIBRACION	CAVITACION	\$ 10.674.934
BOMBA 57	BASE	TEMPERATURA	ROTURA	\$ 22.721.369
REDUCTOR 37	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 5.610.849
BOMBA 58	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	SOLTURA	\$ 50.571.431
REDUCTOR 38	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON AGUA	DESGASTE EXCESIVO	\$ 9.625.537
BOMBA 59	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	FISURA	\$ 11.650.212
REDUCTOR 39	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 2.611.986
BOMBA 60	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	CORROSION	\$ 11.776.538
CILINDRO 14	CABEZAL	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 19.383.491
CILINDRO 15	CAÑERIA	FUGA DE AGUA	FISURA	\$ 17.448.316
AGITADOR 7	RODAMIENTO	TRABAMIENTO	FALLA DE LUBRICACION	\$ 22.727.261
BOMBA 61	CARCASA	FUGA DE ACEITE	ROTURA	\$ 1.883.250
AGITADOR 8	ESTRUCTURA	FUGA DE FLUIDO	ROTURA	\$ 4.830.200
VENTILADOR 3	RODAMIENTO	VIBRACION	SOLTURA	\$ 17.219.671
BOMBA 62	SELLO MECANICO	FUGA DE FLUIDO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 24.006.362
BOMBA 63	IMPULSOR	PERDIDA DE PRESION	DESGASTE EXCESIVO	\$ 19.126.623
BOMBA 64	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	FISURA	\$ 21.780.948
BOMBA 65	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	CORROSION	\$ 10.755.007
VENTILADOR 4	ESTRUCTURA	TRABAMIENTO	ROZAMIENTO	\$ 7.329.390
BOMBA 66	IMPULSOR	PERDIDA DE AJUSTE	CAVITACION	\$ 16.335.314
LINEA 1	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	SEPARACION DE JUNTAS	\$ 9.102.746
REDUCTOR 40	FILTRO	CONTAMINACION CON AGUA	CORROSION	\$ 1.793.045
BOMBA 67	SELLO MECANICO	FUGA DE AGUA	DESGASTE EXCESIVO	\$ 78.403.140
CILINDRO 16	CABEZAL	PERDIDA DE PRESION	PICADURA	\$ 25.486.891
REDUCTOR 41	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 1.746.965
BOMBA 68	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 30.534.139
CILINDRO 17	VALVULA	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 3.373.112

BOMBA 69	SELLO MECANICO	PERDIDA DE PRESION	FISURA	\$ 10.105.728
REDUCTOR 42	RODAMIENTOS	VIBRACION	DANO EN RODAMIENTO	\$ 7.203.572
CILINDRO 18	CABEZAL	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 90.095.514
REDUCTOR 43	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON AGUA	JUEGO EXCESIVO	\$ 17.911.989
AGITADOR 9	ESTRUCTURA	EXCESO CARGA ELECTRICA	SOBRECARGA	\$ 29.245.167
CILINDRO 19	RODAMIENTO	VIBRACION	FISURA	\$ 5.775.158
LINEA 2	VALVULA	FUGA DE FLUIDO	FISURA	\$ 971.068
BOMBA 70	RODAMIENTO	PERDIDA DE AJUSTE	CORROSION	\$ 11.824.246
REDUCTOR 44	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ -
BOMBA 71	SELLO MECANICO	FUGA DE AGUA	DESGASTE EXCESIVO	\$ 9.440.588
REDUCTOR 45	CARCASA	RUIDO	DESNIVELACION	\$ 56.045.596
REDUCTOR 46	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 5.273.757
POLIN 3	ENGRANE	PERDIDA DE AJUSTE	SOLTURA	\$ 764.504
REDUCTOR 47	PERNO	PERDIDA DE AJUSTE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 2.010.747
CILINDRO 20	DESCANSO	VIBRACION	SOLTURA	\$ 9.839.118
REDUCTOR 48	ENGRANAJE	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ -
AGITADOR 10	ESTRUCTURA	PERDIDA DE CENTRADO	ROTURA	\$ 2.779.544
BOMBA 72	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 5.657.696
BOMBA 73	VALVULA	FUGA DE FLUIDO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 1.124.588
AGITADOR 11	ESTRUCTURA	FUGA DE FLUIDO	SOLTURA	\$ 1.836.810
REDUCTOR 49	RODAMIENTO	TEMPERATURA	DESALINEAMIENTO	\$ 860.650
AGITADOR 12	CAMISA	FUGA DE FLUIDO	ABRASION	\$ 5.293.753
BOMBA 74	SELLO MECANICO	FUGA DE AGUA	SOLTURA	\$ 13.864.269
CILINDRO 21	RODAMIENTO	VIBRACION	ROZAMIENTO	\$ 5.809.599
POLIN 4	DESCANSO	TRABAMIENTO	ROZAMIENTO	\$ 1.562.658
BOMBA 75	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	OBSTRUCCION	\$ 335.844
BOMBA 76	CAÑERIA	FLUJO ESCASO	OBSTRUCCION	\$ 12.732.273
BOMBA 77	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 11.656.762
BOMBA 78	DIFUSOR	FUGA DE AGUA	DESGASTE EXCESIVO	\$ 15.640.560
BOMBA 79	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	FISURA	\$ 18.686.752
REDUCTOR 50	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 5.679.195

VENTILADOR 5	ACOPLAMIENTO	EJE SIN ROTACION	ROTURA	\$ 713.644
BOMBA 80				\$ 10.420.916
REDUCTOR 51	ENGRANAJE	VIBRACION	SOLTURA	\$ 15.903.674
REDUCTOR 52	RETEN	FUGA DE ACEITE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 8.987.559
REDUCTOR 53	RETEN	FUGA DE ACEITE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 257.959
BOMBA 81	RODAMIENTO	VIBRACION	ROZAMIENTO	\$ 2.276.872
BOMBA 82	IMPULSOR	TRABAMIENTO	ROTURA	\$ 483.593
REDUCTOR 54	RETEN	FUGA DE ACEITE	PICADURA	\$ 12.706.290
BOMBA 83	EJE	VIBRACION	DEFLEXION	\$ 13.355.297
REDUCTOR 55	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 12.722
CILINDRO 22	VALVULA	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 20.016.018
REDUCTOR 56	RETEN	FUGA DE ACEITE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 2.291.751
REDUCTOR 57	ENGRANAJE	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ -
CILINDRO 23	CABEZAL	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 10.616.114
BOMBA 84	CAÑERIA	FLUJO ESCASO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 1.315.129
REDUCTOR 58	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 2.259.593
REDUCTOR 59	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 22.830.559
COLECTOR 3	SALIDA DE VAPOR	FUGA DE FLUIDO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 6.926.100
REDUCTOR 60	CARCASA	CONTAMINACION CON AGUA	OXIDACION	\$ 1.328.752
BOMBA 85	CAÑERIA	FUGA DE AGUA	DESGASTE EXCESIVO	\$ 75.302.635
BOMBA 86	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	FISURA	\$ 311.000
BOMBA 87	SELLO MECANICO	FUGA DE FLUIDO	FISURA	\$ 3.945.345
REDUCTOR 61	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 661.732
CILINDRO 24	CABEZAL	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 3.614.798
CILINDRO 25	RODAMIENTO	VIBRACION	DESBALANCEO	\$ 35.722.747
CILINDRO 26	FLANGE	FUGA DE AGUA	FISURA	\$ 5.920.713
ACCIONAMIENTO 4	CILINDRO	FUGA DE AIRE	OBSTRUCCION	\$ 6.753.202
AGITADOR 13	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	CORTE	\$ 5.197.213
REDUCTOR 62	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ -
BOMBA 88	SELLO MECANICO	FUGA DE AGUA	FISURA	\$ 3.676.006
BOMBA 89	RODAMIENTO	VIBRACION	ROZAMIENTO	\$ 4.879.283
VENTILADOR 6	RODAMIENTO	VIBRACION	DESGASTE EXCESIVO	\$ 7.218.949

BOMBA 90	SELLO MECANICO	FUGA DE FLUIDO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 10.272.443
BOMBA 91	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	ROTURA	\$ 53.889
BOMBA 92				\$ 5.500.000
REDUCTOR 63	RODAMIENTO	PERDIDA DE AJUSTE	JUEGO EXCESIVO	\$ 14.550.724
BOMBA 93	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	FISURA	\$ 14.316.140
VENTILADOR 7	DESCANSO	VIBRACION	ROZAMIENTO	\$ 641.323
REDUCTOR 64	PERNO	VIBRACION	DESGASTE EXCESIVO	\$ 410.969
REDUCTOR 65	RETEN	FUGA DE ACEITE	ROTURA	\$ 2.374.896
BOMBA 94	CARCASA	FUGA DE FLUIDO	CORROSION	\$ 3.542.601
AGITADOR 14	ESTRUCTURA	VIBRACION	DESALINEAMIENT O	\$ 5.242.699
VENTILADOR 8	RODAMIENTO	VIBRACION	ROZAMIENTO	\$ 577.074
BOMBA 95	SELLO MECANICO	FUGA DE FLUIDO	FISURA	\$ 3.400.939
REDUCTOR 66	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ -
VENTILADOR 9	ACOPLAMIENTO	EJE SIN ROTACION	CORTE	\$ 742.799
BOMBA 96	RETEN	FUGA DE FLUIDO	FISURA	\$ 1.254.223
BOMBA 97	CAÑERIA	FLUJO ESCASO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 100.094.597
REDUCTOR 67	RETEN	FUGA DE ACEITE	OBJETO EXTRAÑO	\$ 1.917.481
CILINDRO 27	EJE	VIBRACION	SOLTURA	\$ 71.102.805
BOMBA 98	BOMBA	FUGA DE ACEITE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 5.601.668
REDUCTOR 68	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 2.233.675
CILINDRO 28	CAÑERIA	FUGA DE AGUA	CORROSION	\$ 24.071.212
LINEA 3	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	ROTURA	\$ -
REDUCTOR 69	EJE	PERDIDA DE AJUSTE	AGRIPAMIENTO	\$ 50.199.729
CILINDRO 29	CABEZAL	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 1.519.836
REDUCTOR 70	ENGRANAJE	TRABAMIENTO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 1.486.947
BOMBA 99	BOMBA	FUGA DE ACEITE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 124.516.764
AGITADOR 15	EJE	EJE SIN ROTACION	AGRIPAMIENTO	\$ 1.059.538
ESTANQUE 3	MANTO	FUGA FLUIDOS	DESGASTE EXCESIVO	\$ 2.936.097
REDUCTOR 71	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 93.989
VENTILADOR 10	ACOPLAMIENTO	PERDIDA DE AJUSTE	CORROSION	\$ 4.410.906
CILINDRO 30	CAÑERIA	FUGA DE AGUA	DESNIVELACION	\$ 465.500

BOMBA 100	RODAMIENTO	PERDIDA DE AJUSTE	SOLTURA	\$ 2.662.701
AGITADOR 16	ASPA	PERDIDA DE CENTRADO	CORROSION	\$ 29.828.487
BOMBA 101	SELLO MECANICO	FUGA DE FLUIDO	FISURA	\$ 7.001.276
LINEA 4	CAÑERIA	VIBRACION	CORTE	\$ 34.683.729
CILINDRO 31	CABEZAL	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 1.585.893
BOMBA 102	CAÑERIA	PERDIDA DE AJUSTE	OBSTRUCCION	\$ 1.756.691
LINEA 5	CAÑERIA	PERDIDA DE PRESION	DESGASTE EXCESIVO	\$ 15.884.269
BOMBA 103	RODAMIENTO	RUIDO	SOLTURA	\$ 5.972.825
REDUCTOR 72	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$ 797.746
LANZA 2	CAÑERIA	PERDIDA DE AJUSTE	DESNIVELACION	\$ 11.674.215
BOMBA 104	SELLO MECANICO	FUGA DE AGUA	DESGASTE EXCESIVO	\$ 9.377.118
VENTILADOR 11	ACOPLAMIENTO	EJE SIN ROTACION	ROTURA	\$ 385.313
VENTILADOR 12	VENTILADOR	VIBRACION	DESALINEAMIENTO	\$ 2.672.209
POLIN 5	RODAMIENTO	VIBRACION	JUEGO EXCESIVO	\$ 17.865.755
VENTILADOR 13	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	CORTE	\$ 6.486.493
BOMBA 105	SELLO MECANICO	PERDIDA DE AJUSTE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 40.995.000
BOMBA 106	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	FALLA CHAVETA	\$ 8.649.728
BOMBA 107	MACHON	PERDIDA DE AJUSTE	ROTURA	\$ 24.194.004
LINEA 6	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	CORROSION	\$ 5.133.523
REDUCTOR 73	RODAMIENTO	VIBRACION	SOLTURA	\$ 27.952.768
CILINDRO 32	CABEZAL	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 2.161.913
BOMBA 108	CARCASA	FUGA DE ACEITE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 9.037.781
AGITADOR 17	FLANGE	PERDIDA DE CENTRADO	EXCENRICIDAD	\$ 5.863.557
BOMBA 109	RODAMIENTO	VIBRACION	JUEGO EXCESIVO	\$ 713.130
ACCIONAMIENTO 5	CILINDRO	TRABAMIENTO	OBSTRUCCION	\$ 1.974.645
REDUCTOR 74				\$ 1.868.685
LINEA 7	BASE	CONTAMINACION CON POLVO	CORROSION	\$ 483.317
BOMBA 110				\$ 22.629.567
POLIN 6	EJE	PERDIDA DE AJUSTE	EXCENRICIDAD	\$ 10.507.322
BOMBA 111	EJE	PERDIDA DE AJUSTE	DESGASTE EXCESIVO	\$ 3.705.463
CILINDRO 33	CABEZAL	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$ 2.908.110

REDUCTOR 75	RODAMIENTO	VIBRACION	SOLTURA	\$	2.681.132
REDUCTOR 76	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$	-
BOMBA 112				\$	11.267.043
BOMBA 113	FLANGE	FUGA DE FLUIDO	DESGASTE EXCESIVO	\$	5.039.721
REDUCTOR 77	RODAMIENTO	CONTAMINACION CON POLVO	DESGASTE EXCESIVO	\$	-
BOMBA 114	RODAMIENTO	PERDIDA DE AJUSTE	CORROSION	\$	2.931.147
VENTILADOR 14	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	CORTE	\$	1.523.964
AGITADOR 18	RODAMIENTO	RUIDO	FALLA DE LUBRICACION	\$	485.024
LINEA 8	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	DESGASTE EXCESIVO	\$	4.573.542
REDUCTOR 78	ENGRANAJE	TRABAMIENTO	DESGASTE EXCESIVO	\$	2.059.182
AGITADOR 19	CORREA	RUIDO	CORTE	\$	18.932.792
BOMBA 115	VALVULA	PERDIDA DE AJUSTE	DESGASTE EXCESIVO	\$	684.190
REDUCTOR 79	RETEN	FUGA DE ACEITE	DESGASTE EXCESIVO	\$	620.496
CILINDRO 34	CABEZAL	FUGA DE AGUA	SOLTURA	\$	521.107
REDUCTOR 80	RETEN	FUGA DE ACEITE	DESGASTE EXCESIVO	\$	-
LINEA 9	CAÑERIA	FUGA DE FLUIDO	CORROSION	\$	1.575.562
ACCIONAMIENTO 6	REGULADOR	DESTRUCCION	OXIDACION	\$	14.794.003
REDUCTOR 81	EJE	FUGA DE ACEITE	DESGASTE EXCESIVO	\$	3.080.251
REDUCTOR 82	ACOPLAMIENTO	VIBRACION	FISURA	\$	1.975.040
CILINDRO 35	FLANGE	FUGA DE AGUA	ROTURA	\$	1.844.515
REDUCTOR 83	RETEN	FUGA DE ACEITE	DESGASTE EXCESIVO	\$	-
CILINDRO 36	RODAMIENTO	VIBRACION	FISURA	\$	3.234.859
LINEA 10	TAPA	NO EVACUACIÓN CONDENSADO	ROTURA BALDE	\$	5.748.811
REDUCTOR 84	TORNILLO SIN FIN	TRABAMIENTO	AGRIPAMIENTO	\$	4.763.794

