

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE DE CONCEPCIÓN – REY BALDUINO DE BÉLGICA

***“Plan de mantenimiento integral para deshollinadores
IK-700: Basado en análisis de criticidad”***

Trabajo de titulación para optar al título de
Ingeniería en Mantenimiento industrial,
con Licenciatura en Ingeniería

Alumno:
Marcelo Alexis Erices Riquelme

Profesor Guía:
Marcelo Quiroz Neira



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Plan de mantenimiento integral para chiller marca IK-700: Basado en
análisis de criticidad.

Nombre del candidato(a): Marcelo A. Alex, Erick Riquelme.

Carrera / Grado: Ingeniería en Mantenimiento Industrial.

Campus: Concepción

Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, MARCO QUIROZ N., en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del
trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 3/7/26

Firma:

MARCO QUIROZ N.

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 03/07/26

Firma:

DEDICATORIA

Quiero comenzar agradeciéndoles a mis padres, quienes han sido mi principal ejemplo de vida, muchas gracias por su esfuerzo para poder permitir que yo estudiara lo que elegí, confiar y jamás dudar de mí, gracias por los consejos que me han dado y las enseñanzas, que me han permitido cumplir cada meta que me he propuesto hasta el momento, y enseñarme que todo sacrificio vale la pena para alcanzar los objetivos, y que por más difícil que parezca no hay que darse por vencido. Ellos son mi mayor inspiración.

A mis hermanos y a mi familia, ya que ellos fueron un apoyo muy importante a lo largo de todos estos años de estudio, dándome el ánimo para poder continuar y no darme por vencido ante las diferentes dificultades a lo largo de los años, siempre preguntando por mí y como me estaba yendo en mi carrera, se les agradece mucho su preocupación.

También quiero agradecerle a mi pareja por siempre apoyarme en todas mis decisiones, por su paciencia y su compañía, por el apoyo que me ha dado, por celebrar mis pequeños logros, Por preocuparse por mí y cuidarme en momentos difíciles, ha sido una parte muy importante dentro de este proceso.

Además quiero agradecer a mis compañeros de estudio y amigos, que los conozco desde que empezamos a estudiar el técnico y han sido varios años de apoyo mutuo y un grato ambiente universitario, también quiero agradecer a los diferentes profesores que han sido parte de mi aprendizaje durante la carrera, aportando sus diferentes conocimientos y enseñándonos con paciencia y aconsejándonos para nuestro futuro laboral, A cada persona que ha aportado de una u otra manera a mi crecimiento personal y universitario el cual se verá reflejado en la vida laboral.

Muchas gracias a todos ustedes porque cada gesto, palabra o acción, forma parte de este logro en mi vida.

RESUMEN

El uso de deshollinadores retractiles permite realizar limpiezas automáticas y programadas sin necesidad de detener la operación de la caldera, asegurando una transferencia térmica óptima y un rendimiento estable, Siendo esenciales en sectores industriales y de celulosa, en el contexto de la industria celulosa donde la disponibilidad de vapor es fundamental para la línea de producción de pulpa y secado, representan un pilar fundamental en la gestión de confiabilidad, seguridad y eficiencia energética dentro de las plantas de celulosa.

Esta investigación se centra en el estudio técnico y operativo de los deshollinadores de la caldera recuperadora N°1, de la planta de celulosa para la limpieza de las superficies internas de la caldera. Se aborda sus principios de funcionamiento, componentes principales y un nuevo plan de mantenimiento, con estandarización de sus mantenimientos.

El análisis incluye una evaluación del sistema de mantenimiento actual de los equipos, identificando las fallas más comunes en los equipos y sus causas probables. A través de una metodología basada en la criticidad, se determinará la importancia de los componentes en función de su impacto en la continuidad operacional, además de enfocarnos en la seguridad de las personas durante las tareas de mantenimiento, incorporando un protocolo estandarizado a las inspecciones de estos equipos, ya que este marca la diferencia de un mantenimiento seguro y eficiente, Asimismo se desarrollaran recomendaciones orientadas a mejorar la rutina de inspección, lubricación, y verificación de las condiciones del equipo, Así finalmente optimizar los tiempos de parada y asegurar un mantenimiento confiable y eficiente en el sistema de deshollinadores.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: OBJETIVOS DEL PROYECTO	2
1.1 Objetivo general:	3
1.2 Objetivos específicos:	3
CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	4
2.1 Presentación de la Problemática:	5
2.2 Justificación:	7
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	8
3.1 Fundamentos del Mantenimiento Industrial:	9
3.2 Importancia del Mantenimiento Industrial:	9
3.3 Tipos de Mantenimiento Industrial.....	10
3.4 Como gestionar el Mantenimiento en una empresa:	12
3.5 Herramientas y técnicas más utilizadas del Mantenimiento Industrial:	13
3.6 Indicadores de Mantenimiento:	15
3.7 Herramientas de análisis y cuantificación de fallos:	17
CAPÍTULO 4: CONTEXTO OPERACIONAL DEL DESHOLLINADOR	21
EN LA CALDERA RECUPERADORA, CMPC CELULOSA	21
4.1 Contexto histórico:.....	22
4.2 Antecedentes generales:	23
4.3 Ubicación de la Caldera Recuperadora N°1:	24
.....	24
4.4 Las principales partes de una caldera recuperadora:	25
4.5 Importancia de los Deshollinadores.	28
4.6 Descripción mecánica del Sistema.....	30
4.7 Deshollinador Diamond Power IK-700	38
4.7.1 Características Técnicas:	39
4.8 Ciclo Operativo:	40
.....	41
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO	42
5.1 Análisis del plan de mantenimiento Actual:	43

5.2 Historial de Fallas del deshollinador:	44
5.3 Programa semanal de Mantenimiento:	45
5.4 Principales Fallas:	46
5.5 Análisis de falla mediante diagrama de Ishikawa:	48
.....	48
5.6 Matriz de Criticidad:	49
5.7 Análisis de falla y efectos de falla AMEF:	50
5.7.1 Tabla de Resultados del Análisis AMEF:	51
5.7.2 Priorización según los resultados obtenidos:	52
5.8 Diagrama de Jack Knife:	53
5.9 Planificación del Mantenimiento:	54
5.9.1 Ruta de Inspección de los equipos:	55
5.9.2 Distribución de los equipos en la ruta de inspección:	55
5.9.3 Criterios técnicos y Puntos de inspección por equipo:	56
5.10 Mantenimiento Preventivo recomendado para el equipo:	58
5.11 Tecnologías de Mantenimiento Predictivo:	59
.....	59
5.11.1 Vibroanálisis: Protocolo de Medición de puntos críticos en IK-700:	60
5.12 Integración de Tecnologías de Monitoreo de Condición (PdM):	62
5.13 Plan de Lubricación por componente:	64
.....	64
5.14 Formato de registro de ruta de Inspección:	65
5.15 Elementos de Apoyo y seguridad:	66
5.15.1 El Permiso de Trabajo (PT):	67
5.15.2 Permiso de Trabajo en Caliente:	68
5.15.3 Estándar de Ejecución de Mantención:	69
5.16 Plan de capacitación del personal:	70
5.16.1 Digitalización del Mantenimiento: Software Fractal:	71
5.16.2 Indicadores más comunes en un GMAO	72
5.16.3 Estrategia de implementación de Software Fractal:	73
CAPÍTULO 6: EVALUACIÓN ECONÓMICA	74
6.1 Evaluación Económica y factibilidad del proyecto:	75

6.2 Inversión Sistema de Vibroanálisis:	75
6.3 Inversión de Cámara Termográfica:	76
6.4 Gestión de Activos mediante: GMAO	76
6.5 CAPEX	77
6.6 Ahorro Anual:	78
6.6.1 Análisis del ciclo de maduración y eficiencia del plan Predictivo:	79
6.7 Optimización de Horas extra:	79
6.8 Evaluación de Rentabilidad VAN y TIR:	80
Conclusión:	84
Bibliografía y fuentes de información:	86

SIGLA Y SIMBOLOGIA

AMEF – Análisis de Modo y Efecto de Falla
CAPEX – Capital Expenditure (Gastos/Inversión de Capital)
CBC – Constructora y Fundición CBC (fabricante de la caldera)
CLP – Peso Chileno
CMMS – Computerized Maintenance Management System (Software de Gestión de Mantenimiento)
CMPC – Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones
ESP – Precipitador Electrostático (Electrostatic Precipitator)
FLIR – Marca de cámaras termográficas
GMAO – Gestión del Mantenimiento Asistida por Computador
HE – Horas Extra
IK – Modelo de soplador de hollín retráctil (línea IK-700, Diamond Power)
ISO – International Organization for Standardization
ITC – Certificación Internacional (capacitación en termografía/análisis de vibraciones)
KPI – Key Performance Indicator / Indicador Clave de Desempeño
LK – Modelo de soplador de hollín (Diamond Power IK-700)
LTDA – Limitada
MTBF – Mean Time Between Failures / Tiempo Medio Entre Fallas
MTTF – Mean Time To Failure / Tiempo Medio hasta la Falla
MTTR – Mean Time To Repair / Tiempo Medio de Reparación
MX – Modelo de analizador de vibraciones (Digivibe MX)
NFPA – National Fire Protection Association
NPR – Número de Prioridad de Riesgo
OPEX – Operating Expense (Gastos Operacionales)
OSHA – Occupational Safety and Health Administration
OT – Orden de Trabajo
PT – Permiso de Trabajo
RCA – Root Cause Analysis / Análisis Causa Raíz
ROI – Return on Investment / Retorno de la Inversión
RPM – Revoluciones por Minuto
SHC – Línea de lubricantes sintéticos Mobil (Mobilgear/Mobilith SHC)
SKF – Marca de rodamientos
TIR – Tasa Interna de Retorno
VAN – Valor Actual Neto
VTF – Ventilador de Tiro Forzado
VTI – Ventilador de Tiro Inducido

INTRODUCCIÓN

La industria de la Celulosa cumple un rol muy importante dentro de Chile, tanto por su aporte económico como por su impacto social. Es un sector que transforma materia prima forestal, principalmente pino radiata y eucalipto, en productos de alto valor agregado como pulpa de celulosa, papel y cartón, los cuales son exportados a mercados internacionales.

La caldera cumple un rol muy importante dentro de todo este proceso productivo de la celulosa, ya que genera el vapor necesario para múltiples etapas del proceso, cocción de la madera, secado de la pulpa, calentamiento de licores y operación de turbinas. Además de la recuperación de productos químicos del proceso.

Los deshollinadores son equipos que operan en la caldera, y su función es mantener la eficiencia térmica de la caldera y la continuidad del proceso productivo. Estos equipos son los encargados de eliminar los depósitos de hollín, cenizas y residuos sólidos que se adhieren en el interior de la caldera, Al interior de la caldera recuperadora N°1 hay un total de 43 deshollinadores, que operan de forma automatizada y requieren de un mantenimiento frecuente.

Por ello su plan de mantenimiento es importante para que sus procesos cumplan con los estándares de calidad, ya que esto garantiza una continuidad operacional, eficiencia y confiabilidad.

La finalidad de este informe es realizar un análisis del equipo, enfocado en la estandarización del mantenimiento, conocer las fallas y la criticidad de los componentes, para así proponer un plan de mantenimiento integral, mejorando su mantenimiento correctivo, sumándole mantenimiento preventivo y tecnología de mantenimiento predictivo, para así lograr un mejor desempeño de los equipos al igual que aumentar su vida útil, disminuir las paradas no programadas y los costos de estas.

CAPÍTULO 1: OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1 Objetivo general:

Elaborar un plan de Mantenimiento Integral para los deshollinadores de caldera, basado en un análisis de criticidad a los componentes del equipo y estandarización del plan de mantenimiento.

1.2 Objetivos específicos:

- Analizar plan de mantenimiento actual, historial de fallas de los equipos e identificar los componentes críticos del deshollinador.
- Estandarizar el mantenimiento correctivo y preventivo de los equipos y gestionar las nuevas herramientas de mantenimiento predictivo para el equipo.
- Revisar condiciones de trabajo y realizar un protocolo de seguridad.
- Realizar diseño de la ruta de inspección de los equipos.

CAPÍTULO 2: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

2.1 Presentación de la Problemática:

En la industria CMPC celulosa el deshollinador Diamond Power LK-700 es un activo crítico para mantener la eficiencia de la caldera. La acumulación de hollín y escoria en las superficies interiores de la caldera reduce la eficiencia térmica, Por lo tanto, la disponibilidad y el correcto funcionamiento de este equipo es esencial para la continuidad y la rentabilidad operativa.

Actualmente a estos equipos se les realiza un predominante mantenimiento correctivo y no tiene una descripción detallada de los ajustes preventivos necesarios para el equipo, Este enfoque implica que las intervenciones se realizan solo después de que un equipo falla, si bien es muy difícil evitar fallas en la totalidad de los equipos, pero genera una serie de consecuencias operacionales como:

Paradas no programadas: Al aplicar mantenimiento correctivo la mayoría de las paradas no son programadas, pero a diferencia del mantenimiento preventivo, podríamos ahorrar tiempo y minimizar costos con paradas programadas o periódicas para los equipos.

Reducción de la confiabilidad Operacional: La operación al límite de la falla de los equipos genera incertidumbre operacional y en la disponibilidad del equipo.

Uso Recurrente de Horas Extras: El fallo repentino en un equipo crítico como el IK-700 exige una respuesta inmediata para restaurar la capacidad de limpieza de la caldera. Esta urgencia obliga a la empresa a recurrir sistemáticamente al pago de horas extras y a la movilización de personal fuera de horario, lo que incrementa significativamente los costos laborales del mantenimiento no planificado.

Variabilidad en la ejecución: La falta de una pauta técnica estandarizada obliga al personal de mantenimiento a intervenir los equipos basándose en el criterio personal, en el mantenimiento, esta es una fuente primaria de fallas y falta de confiabilidad.

Incremento del MTTR: El tiempo medio de reparación es un indicador clave de la mantenibilidad de un activo, cuando el equipo técnico no dispone de manuales, listados de herramientas o secuencias de pasos predefinidas, el tiempo de intervención se extiende innecesariamente.

Ineficiencia de las Inspecciones Actuales: Las inspecciones visuales solo confirman fallas cuando estas son ya muy avanzadas. Por ejemplo, una inspección visual no puede detectar la desalineación o el inicio de una fatiga en un rodamiento del carro; solo lo detectará cuando el fallo ya haya causado un bloqueo o vibración destructiva.

Esto provoca una clara problemática en cuanto al mantenimiento actual de la empresa, a la operación continua y la planificación, esto se define por la ausencia de un programa estructurado de mantenimiento integral y la utilización y la capacitación del personal en cuanto a las tecnologías de monitoreo.

A continuación, veremos cómo puede la implementación de un programa de mantenimiento integral, utilizando tecnologías de monitoreo de condición aplicadas a los deshollinadores, mitigar los riesgos de fallas críticas, reducir los costos asociados a las horas extras y a los errores técnicos al momento de la mantención, e incrementar la disponibilidad efectiva de los deshollinadores.

2.2 Justificación:

La justificación de mi proyecto es principalmente porque yo hice mi práctica profesional en esta empresa que presta servicios de mantención a la CMPC, en el cual muchas veces yo como practicante desconocía de los procedimientos claves para el mantenimiento de los equipos y faltaba una estandarización de este, además de que no contaban con una base de datos de los equipos, para así poder analizar los equipos y poder determinar ciertos periodos de frecuencia entre las fallas.

La inexistencia de una base de datos centralizada impide la transición hacia un mantenimiento inteligente. Tenemos historial de falla, pero no analizamos estos datos, por eso no se calculan indicadores clave de desempeño (KPIs) como el MTBF (Tiempo Medio Entre Fallas) o el MTTR (Tiempo Medio de Reparación). La implementación de un registro inteligente permitirá determinar frecuencias de intervención óptimas, dejando atrás la improvisación y permitiendo una planificación basada en la evidencia técnica y no en la intuición.

Este plan integral busca establecer protocolos que aseguren intervenciones seguras y el uso de tecnologías de diagnóstico, como el vibroanálisis, para anticiparse a eventos catastróficos, Además de la incorporación de software de mantenimiento para un mayor análisis y mejor sistema de control sobre las mantenciones de los equipos.

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

3.1 Fundamentos del Mantenimiento Industrial:

El mantenimiento industrial es el conjunto de acciones técnicas y administrativas que permiten el correcto funcionamiento de equipos, instalaciones o maquinaria de distintos sectores industriales, estos procesos incluyen la reparación, revisión y monitoreo del desempeño de los elementos que intervienen en las tareas de un sistema productivo.

Su objetivo principal es evitar fallas, corregir averías y mejorar el rendimiento de los activos industriales, además de evitar paradas imprevistas, y asegurar que la maquinaria opere bajo las condiciones óptimas de seguridad, calidad y sostenibilidad. Juega un papel clave en la planificación de la producción y en el aumento de la confiabilidad.

3.2 Importancia del Mantenimiento Industrial:

La función más evidente es evitar fallas, pero el mantenimiento industrial tiene múltiples propósitos estratégicos dentro de una empresa.

- **Maximización de la disponibilidad y confiabilidad de los equipos:**
El mantenimiento adecuado garantiza que los equipos estén disponibles cuando se necesiten y funcionen de manera confiable. Esto reduce los tiempos de inactividad no planificados y aumenta la productividad de la planta.
- **Seguridad del personal:**
El mantenimiento regular y adecuado de los equipos contribuye a garantizar un entorno de trabajo seguro. Los equipos en buen estado disminuyen los riesgos de accidentes y lesiones laborales.

- Optimización de costos:
El mantenimiento planificado y adecuado ayuda a prevenir fallos catastróficos y costosas reparaciones de emergencia. Al detectar y corregir problemas de manera oportuna, se evitan costosos tiempos de inactividad y se optimiza el uso de recursos.
- Prolongación de la vida útil de los equipos:
El mantenimiento preventivo y predictivo permite detectar y corregir problemas antes de que se conviertan en fallos importantes. Esto ayuda a prolongar la vida útil de los equipos y maximizar el retorno de la inversión.

Por todo esto, cada vez son más las empresas que invierten en estrategias de mantenimiento predictivo, apoyadas en tecnologías como sensores inteligentes y análisis de datos.

3.3 Tipos de Mantenimiento Industrial:

El mantenimiento industrial se puede clasificar en diferentes tipos, cada uno con su enfoque y propósitos específicos. Estos son los tipos de mantenimiento utilizados en la industria.

Mantenimiento Correctivo:

Este se lleva a cabo una vez que ocurre una avería o falla en el equipo. Se realiza la reparación necesaria para restaurar el funcionamiento normal de los equipos. Si bien el mantenimiento correctivo puede ser inevitable en algunos casos, su objetivo es minimizar el tiempo de actividad y las interrupciones no planificadas a través de una respuesta rápida y eficiente a los fallos.

Mantenimiento Preventivo:

El mantenimiento preventivo se basa en la realización de actividades planificadas y sistemáticas para evitar fallos y mantener los equipos en condiciones óptimas. Este enfoque implica inspecciones periódicas, lubricación, ajustes, limpieza y reemplazo programado de piezas desgastadas. El objetivo principal del mantenimiento preventivo es prevenir problemas antes de que ocurran, reduciendo los riesgos de tiempos de inactividad no planificados y costosas reparaciones.

Mantenimiento Proactivo:

El mantenimiento proactivo se centra en identificar y eliminar las causas raíz de los problemas y fallos recurrentes en los equipos. Se lleva a cabo un análisis detallado de los sistemas y procesos para identificar las debilidades y se implementan acciones correctivas para mejorar la fiabilidad y el rendimiento de los equipos. Este enfoque busca evitar que los problemas se repitan.

Mantenimiento Predictivo:

El mantenimiento predictivo se basa en la monitorización continua de los equipos y la recopilación de datos en tiempo real para predecir la necesidad de mantenimiento. Se utilizan tecnologías y herramientas avanzadas, como el análisis de vibraciones, la termografía y el análisis de aceite, para detectar signos tempranos de problemas y degradación en los equipos. Al predecir el momento óptimo para el mantenimiento, se pueden programar las intervenciones en los momentos más convenientes, evitando tiempos de inactividad innecesarios y costosos.

Cada tipo de mantenimiento tiene sus ventajas y desafíos. En muchas situaciones, una combinación de enfoques puede ser necesaria para lograr un mantenimiento eficiente y efectivo. La elección del tipo de mantenimiento dependerá de factores como la criticidad del equipo, los costos asociados, la disponibilidad de recursos y las regulaciones aplicables.

3.4 Como gestionar el Mantenimiento en una empresa:

La gestión del mantenimiento industrial es fundamental para garantizar una ejecución efectiva y eficiente de las actividades de mantenimiento. Implica la planificación, organización, control y seguimiento de todas las tareas y recursos relacionados con el mantenimiento.

Planificación y programación de actividades de mantenimiento:

La planificación y programación adecuadas de las actividades de mantenimiento son esenciales para optimizar el tiempo y los recursos. Esto implica la identificación de tareas, la estimación de los recursos necesarios, la asignación de personal y la elaboración de un cronograma detallado. Una buena planificación y programación ayudan a evitar conflictos, maximizar la eficiencia y minimizar los tiempos de inactividad no planificados.

Gestión de activos y optimización de la disponibilidad:

La gestión de activos se centra en el mantenimiento, seguimiento y optimización de los equipos y activos de la organización. Implica el registro y seguimiento de información relevante sobre los equipos, como historiales de mantenimiento, datos de rendimiento y características técnicas. La optimización de la disponibilidad de los activos se logra a través de una gestión proactiva que incluye la programación de mantenimiento, el control de inventario y la toma de decisiones basada en datos. Una de las formas más efectivas para esto es el uso de un software para mantenimiento industrial.

Gestión de repuestos y materiales:

La gestión eficiente de repuestos y materiales es esencial para garantizar una respuesta rápida y efectiva a las necesidades de mantenimiento. Esto implica llevar un inventario adecuado de piezas de repuesto, materiales y herramientas necesarios para las intervenciones de mantenimiento. Una gestión adecuada de repuestos y materiales minimiza los tiempos de espera y garantiza la disponibilidad de los recursos necesarios en el momento oportuno.

La gestión adecuada del mantenimiento industrial ayuda a optimizar los recursos, mejorar la eficiencia y garantizar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos. Al aplicar enfoques de gestión eficientes, las organizaciones pueden maximizar el retorno de la inversión en mantenimiento y lograr una operación más rentable y sostenible.

3.5 Herramientas y técnicas más utilizadas del Mantenimiento Industrial:

Análisis de vibraciones: Se utiliza para evaluar el estado de los equipos detectando vibraciones anormales que pueden indicar desequilibrios, desalineaciones, desgastes o problemas en los rodamientos. Se emplean instrumentos de medición de vibraciones y software de análisis para identificar las frecuencias y amplitudes anormales y tomar acciones correctivas antes de que ocurran daños graves.

Termografía:

La termografía utiliza cámaras termográficas para detectar y evaluar la radiación infrarroja emitida por los equipos. Permite identificar problemas de temperatura anormales que pueden indicar puntos calientes, fugas de calor, sobrecalentamientos o problemas de aislamiento. La termografía es especialmente útil para la detección temprana de problemas eléctricos, mecánicos y de equipos rotativos.

Análisis de lubricantes:

El análisis de lubricantes consiste en evaluar las propiedades físicas y químicas de los aceites y lubricantes utilizados en los equipos. Permite detectar contaminantes, agua, desgaste de metales, niveles de aditivos y condiciones generales del lubricante. El análisis de lubricantes ayuda a determinar la necesidad de cambios de aceite, detectar problemas de desgaste y prevenir fallos prematuros de los equipos.

Inspecciones visuales:

Las inspecciones visuales son fundamentales en el mantenimiento industrial, ya que permiten identificar daños, desgastes, fugas y otras anomalías visibles en los equipos. Los técnicos de mantenimiento utilizan herramientas como cámaras, linternas y equipos de inspección remota para llevar a cabo inspecciones detalladas y documentar las condiciones de los equipos.

Análisis de datos históricos

El análisis de datos históricos implica el uso de software y sistemas de gestión de mantenimiento para recopilar, almacenar y analizar datos de mantenimiento y operación. Permite identificar tendencias, patrones de falla y realizar análisis comparativos a lo largo del tiempo. El análisis de datos históricos ayuda a tomar decisiones basadas en hechos, mejorar las estrategias de mantenimiento y optimizar los programas de mantenimiento preventivo y predictivo.

La elección de las herramientas adecuadas dependerá de los equipos, las necesidades específicas y los recursos disponibles.

3.6 Indicadores de Mantenimiento:

Aunque los KPIs tienen una relación directa con los objetivos que se pretende alcanzar, no son metas. Un KPI de mantenimiento es una métrica que sirve para evaluar el rendimiento de una determinada actividad, activo o departamento.

MTBF - Mean Time Between Failures También conocido como el Indicador de Confiabilidad. Mide la tasa de fallos aleatorios (no previstos), incluso si son causados por fallos de software o defectos de fabricación que comprometen su vida útil. Se excluyen los fallos que no causan tiempos de inactividad del equipo. Cuanto más alto sea el MTBF, más fiable es el equipo – a diferencia del MTTR, que tiene que ser menor.

$$MTBF = \frac{\textit{Tiempo total disponible} - \textit{Tiempo de inactividad}}{\textit{Número de paradas}}$$

MTTR - Mean Time To Repair: El Tiempo Medio de Reparación (MTTR), que puede aplicarse a un equipo, máquina, componente o sistema. El MTTR considera el tiempo medio que tarda su equipo técnico en intervenir o resolver una avería después de que haya ocurrido. A diferencia del MTBF, el objetivo es reducir al máximo este KPI de mantenimiento.

$$MTTR = \frac{\textit{Tiempo Total de Mantenimiento}}{\textit{Número de reparaciones}}$$

MTTF: El MTTF es un indicador que proporciona información valiosa sobre la confiabilidad de los activos y el tiempo promedio entre fallas. El objetivo es maximizar el MTTF, lo que implica reducir la frecuencia de las fallas y prolongar la vida útil de los activos. Un MTTF alto indica que los activos son confiables y tienen una menor probabilidad de experimentar fallas.

$$MTTF = \frac{\text{Tempo total de operação de todos os itens}}{\text{Número total de falhas observadas}}$$

Disponibilidad: La disponibilidad se refiere al tiempo en que los activos están disponibles y listos para operar. Una alta disponibilidad implica que los activos están disponibles cuando se los necesita, lo que reduce el tiempo de inactividad no planificado y aumenta la eficiencia operativa.

$$\text{Disponibilidad} = \left(\frac{\text{Tiempo Operativo}}{\text{Tiempo Total}} \right) \times 100$$

Confiabilidad: Se refiere a la probabilidad de que un activo funcione sin fallas durante un período futuro específico de tiempo. Una alta confiabilidad implica que los activos son más propensos a funcionar correctamente sin experimentar fallas.

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

3.7 Herramientas de análisis y cuantificación de fallos:

Análisis de Criticidad: Es una metodología que jerarquiza los activos de una planta industrial según su impacto en la seguridad, el medio ambiente, la producción y el costo de mantenimiento.

Puntaje de Criticidad= Frecuencia× Severidad× Detección (Opcional)

Severidad (Consecuencia): Mide el impacto de la falla si ocurre.

Frecuencia (Probabilidad): Mide la probabilidad o recurrencia histórica de la falla.

Zona de Criticidad: Aquellos equipos con puntajes más altos se ubican en la Zona Crítica (roja) y requieren las estrategias de mantenimiento más intensivas (PdM).

FRECUENCIA	4	MC	MC	C	C	C
	3	MC	MC	MC	C	C
	2	NC	NC	MC	C	C
	1	NC	NC	NC	MC	C
		10	20	30	40	50
		CONSECUENCIA				

Matriz de Criticidad
Fuente: ResearchGate

AMEF: Es una herramienta analítica que se utiliza para descomponer un sistema e identificar sistemáticamente todas las formas posibles en que puede fallar, y evaluar los efectos de esas fallas.



AMEF
Fuente: Cegid

RCA: Es una metodología sistemática y proactiva que busca identificar la verdadera razón subyacente de un problema, más allá del síntoma o la causa inmediata. No se conforma con la Causa Directa (Ej.: el motor se quemó) o la Causa Contribuyente (Ej: el sello estaba desgastado), sino que busca la Causa Raíz Latente (Ej: el diseño original del sello era inadecuado para la temperatura de operación, o el programa de capacitación del personal no incluía el torque adecuado para el apriete de la prensa estopa).



Análisis de causa raíz
Fuente: Terotecnic Ingeniería

Diagrama de Pareto: “El diagrama de Pareto es un método gráfico para organizar datos de modo que los problemas o defectos se clasifiquen por orden de importancia, desde el más frecuente hasta el menos frecuente. Es una herramienta de priorización que permite a los gerentes concentrar sus esfuerzos en los 'pocos vitales' en lugar de los 'muchos triviales'.” Render, B., & Heizer, J. (2014).

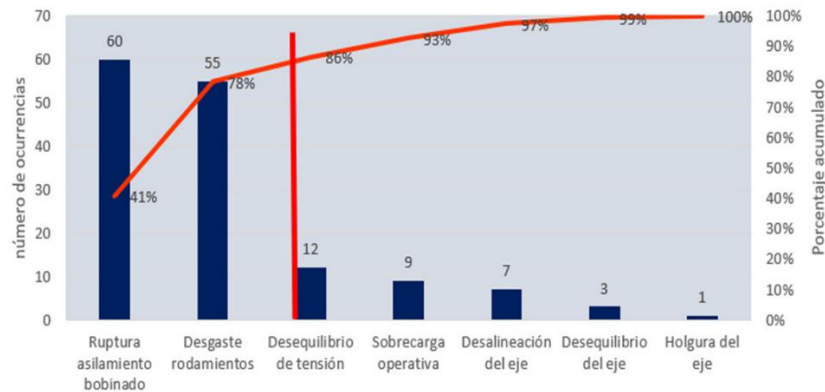


Diagrama de Pareto

Fuente: Cigen

Diagrama de Ishikawa: El Diagrama de Ishikawa es una herramienta gráfica que se utiliza para identificar, clasificar y presentar las posibles causas de un problema de calidad específico. Organiza las relaciones entre un efecto y sus causas potenciales, dividiéndolas típicamente en seis categorías principales denominadas las '6M': Mano de obra, Maquinaria, Métodos, Materiales, Medición y Medio ambiente Ishikawa, K. (1986).

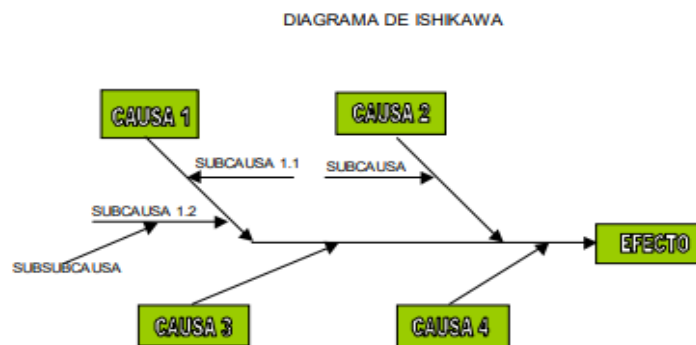


Diagrama de Ishikawa

Fuente: Mecalux

Diagrama de Jack knife: Es una herramienta bastante más completa que el Pareto ya que permite priorizar no solo lo que ocurre más seguido, sino aquello que realmente afecta la disponibilidad y los costos operativos de la caldera de recuperación. Tiene cuatro cuadrantes que son:

- Falla Crítica: Eventos frecuentes y de largo impacto (requieren Mantenimiento Predictivo y Rediseño).
- Falla Aguda: Eventos de bajo impacto, pero alta frecuencia (requieren Análisis Causa Raíz - RCA).
- Falla Crónica: Eventos de baja frecuencia, pero muy tardados en reparar (requieren optimización de procedimientos y repuestos).
- Fallas Triviales: Eventos de bajo impacto y baja frecuencia.

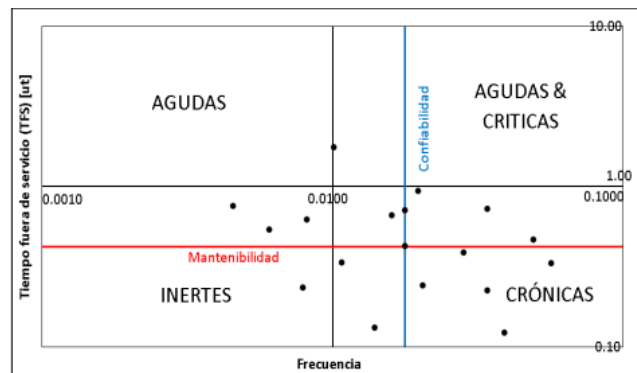


Diagrama de Jack knife
Fuente: Pardus Consulting

CAPÍTULO 4: CONTEXTO OPERACIONAL DEL DESHOLLINADOR
EN LA CALDERA RECUPERADORA, CMPC CELULOSA.

4.1 Contexto histórico:

La industria de la Celulosa ha tenido un papel muy importante en el desarrollo industrial del país, posicionándolo como uno de los principales productores de la pulpa Kraft blanqueada del hemisferio sur. Varias industrias de celulosa se han ido desarrollando a lo largo de los años en nuestro país. Las principales que compiten en este mercado son la CMPC Celulosa S.A(Compañía manufacturera de papeles y cartones), Celulosa Arauco y Constitución S.A(ARAUCO), CMPC ha liderado este crecimiento mediante la instalación de sus plantas ubicadas principalmente en la región del Biobío, Maule y La Araucanía. La planta de celulosa Santa Fe, CMPC, comenzó a operar en 1991 en Nacimiento.

Actualmente, cuenta con 2 líneas de producción que cumplen con los estándares globales medioambientales más exigentes de la industria. El proyecto de mejora, completado en 2012, permitió ampliar la capacidad de producción de su línea 2 de 780.000 ADt/año a 1.119.000 ADt/año. Su producto es la Celulosa Blanca Kraft de fibra corta, a base de madera de eucalipto (BEKP).

Los principales procesos de la planta Santa Fe, son la recepción y procesamiento inicial de la madera de eucalipto, la preparación, lavado y blanqueo de la madera para obtener la pulpa, luego la pulpa se seca y se empaca para su distribución, También tenemos proceso de recuperación química y energética, Tratamiento de efluentes y control ambiental.

La caldera Recuperadora N°1 se encuentra entre los procesos de lavado de pulpa y la planta de recaustificación, formando parte del proceso de recuperación química y energética. El rol fundamental de la caldera recuperadora N°1 en el ciclo productivo dentro de la Planta de Celulosa, se basa fundamentalmente en la recuperación de los químicos utilizados en el proceso de pulpaje, mediante la combustión de licor negro resultante de la cocción. Al mismo tiempo se genera licor verde y vapor de alta presión que es utilizado para la generación eléctrica.

4.2 Antecedentes generales:

En el proceso de producción de la planta Santa Fe, existen 4 calderas, 2 calderas recuperadoras y 2 calderas biomasas, La caldera recuperadora N°1 fue fabricada por la empresa CBC, el combustible que utiliza es licor negro, su capacidad nominal es de 180(ton/h) de vapor, su presión es de 62(bar) y su temperatura de operación es de 450°C cumple un rol fundamental en permitir la recuperación de químicos inorgánicos del licor negro y la generación de vapor para los diferentes procesos.

	Caldera Recuperadora CR1
Fabricante	CBC
Tipo de Caldera	Recuperadora
Combustible	Licor Negro
Capacidad Nominal {ton/h}	180
Presión {bar}/ Temperatura {°c}	62/450

Tabla 4.1 Características principales de la CR1 CMPC Santa Fe.
Fuente: CMPC Santa Fe

En la producción de la celulosa, la madera se somete a una cocción en el digestor mediante una mezcla alcalina conocida como licor blanco (NaOH y Na_2S) que disuelve la lignina y separa las fibras de la celulosa. Este proceso genera un subproducto denominado licor negro, Este licor negro es dirigido a la caldera recuperadora donde es quemado a alta temperatura, liberando una gran cantidad de vapor durante el proceso que es aprovechado en diversas etapas y en turbinas que generan energía eléctrica. Paralelamente la combustión del licor negro permite recuperar los compuestos inorgánicos que se funden en el fondo de la caldera formando un material denominado smelt, este se disuelve para la formación del licor verde, que será procesado en la etapa de caudificación para formar licor blanco nuevamente.

4.3 Ubicación de la Caldera Recuperadora N°1:

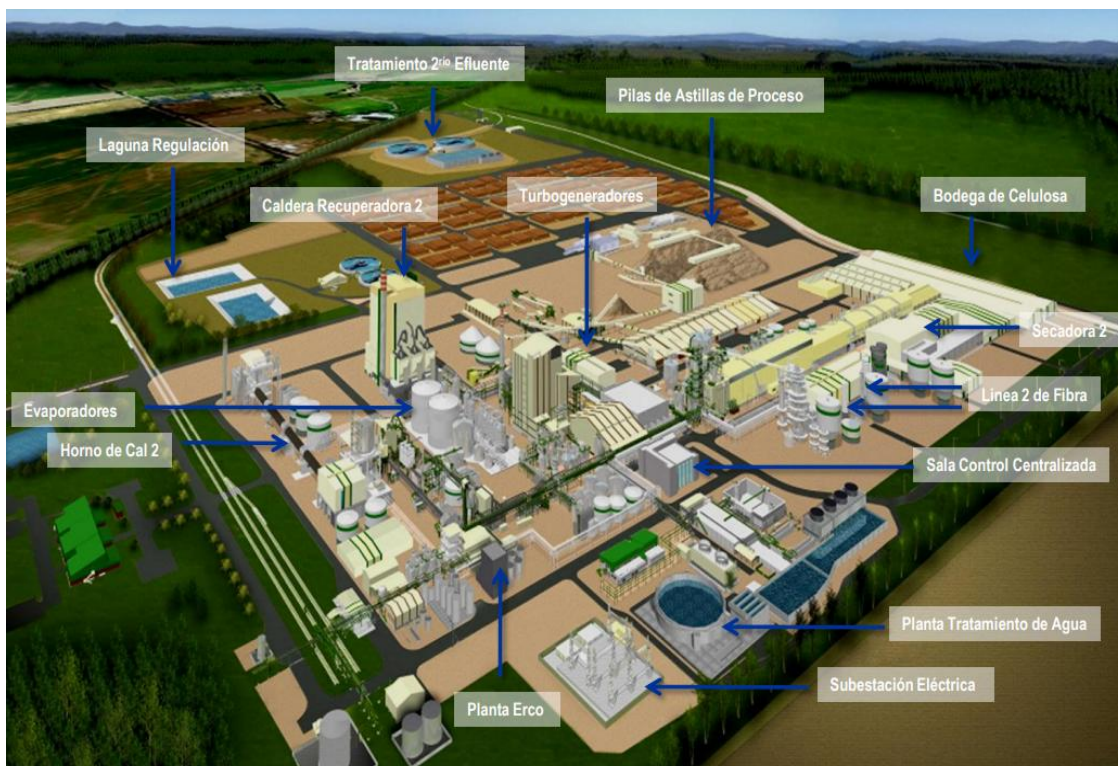


Figura 4.1 Ubicación de Caldera Recuperadora N°1

Fuente: CMPC Santa Fe

La ubicación de la caldera recuperadora como núcleo energético de la planta CMPC define la alta criticidad de los sopladores IK-700 ya que cualquier acumulación de escoria en sus haces tubulares compromete la eficiencia térmica y la generación de vapor necesaria para los turbogeneradores lo que justifica la creación de un plan de mantenimiento integral que estandarice los protocolos de intervención técnica y seguridad en un entorno de alta temperatura y exigencia operativa constante.

4.4 Las principales partes de una caldera recuperadora:

La caldera cuenta con diferentes zonas verticales que se dividen en las siguientes:

Componentes de la CR1

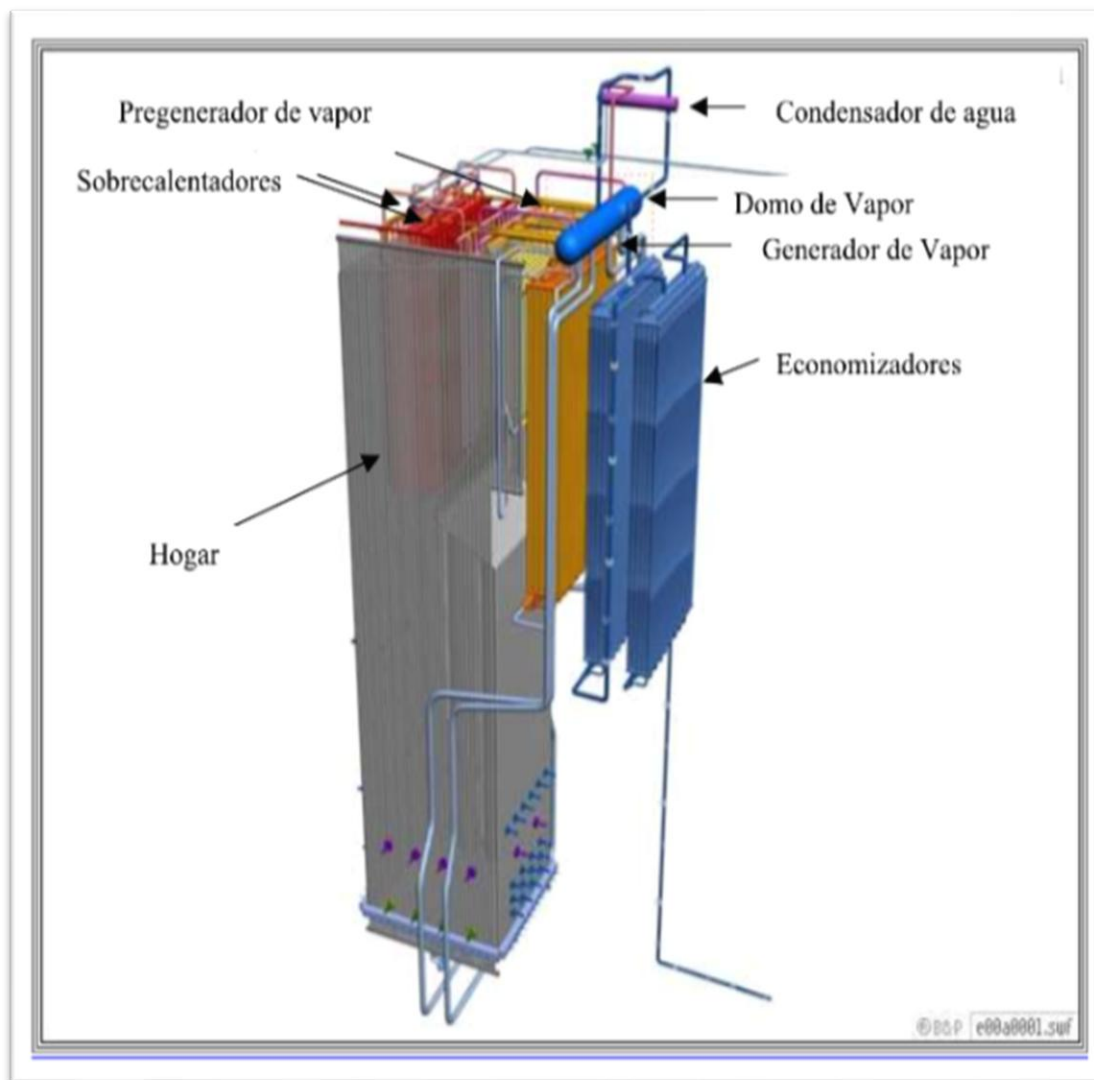


Figura 4.2 Principales Partes de la Caldera.
Fuente: Oficina técnica DSD.

- Hogar: Es el corazón de la caldera donde ocurre la combustión de licor negro y la recuperación de químicos.
- Quemadores de licor negro: Inyectan el licor negro concentrado (combustible) en el hogar
- Paneles de agua (Paredes del hogar): Tubos que cubren las paredes internas del hogar. Absorben el calor por radiación y lo utilizan para generar vapor.
- Boquillas de aire (Niveles):
 - Aire primario: Se inyecta cerca del fondo para la gasificación y combustión de la parte sólida del licor negro.
 - Aire secundario y terciario: Se inyectan a niveles superiores para completar la combustión de los gases volátiles y asegurar el perfil de temperatura.
- Zona de fusión (Lecho de Smelt): La parte inferior del hogar donde las partes fundidas (Smelt) se recogen.
- Canaletas de Fundido: Por donde el Smelt (Licor fundido) drena hacia el estanque disolvedor (parte del sistema auxiliar).
- Zona de transferencia de calor (Convección): Ubicada en la parte superior del hogar, transfiere el calor restante de los gases de combustión al circuito de vapor de agua/vapor por convección
 - Sobrecalentadores (Superheaters): Son los primeros en entrar en contacto con los gases calientes después del hogar. Aumentan la temperatura del vapor saturado para obtener vapor sobrecalentado de alta presión, listo para la turbina. Esta zona es crítica, ya que es donde se acumulan depósitos y donde suelen fallar los deshollinadores.

- Banco de la caldera (Evaporador): Un gran haz de tubos donde el agua se convierte en vapor.
- Economizador: La última sección de transferencia de calor, donde los gases residuales calientan el agua de alimentación antes de que esta entre al banco de la caldera o al domo.
- Sistema de Circulación de agua y vapor: Aseguran el flujo de agua, la calidad del vapor y la presión.
 - Domo de vapor (Tambor superior): Separa el agua del vapor. El vapor saturado se dirige a los sobrecalentadores, y el agua desciende por los tubos.
 - Domo de agua (Tambor inferior): Recoge el agua condensada y permite la recirculación.
- Sistemas Auxiliares: Estos sistemas son cruciales para la operación continua, y muchos de ellos están fuera del cuerpo principal de la caldera.
 - Sistema de deshollinadores: Son lanzas que inyectan vapor o aire comprimido para remover los depósitos de ceniza y hollín de los tubos del sobrecalentador y el economizador, manteniendo la eficiencia de transferencia de calor.
 - Precipitadores Electrostático (ESP): Filtro de control de emisiones que elimina las partículas sólidas (ceniza volante) de los gases antes de que estos salgan por la chimenea.
- Ventiladores:
 - Ventilador de tiro Forzado (VTF): Suministra el aire primario, secundario y terciario para la combustión.

- Ventilador de tiro Inducido (VTI): Extrae los gases de combustión de la caldera y los empuja través del precipitador y la chimenea.

4.5 Importancia de los Deshollinadores.

El funcionamiento continuo de las calderas genera la acumulación de depósitos de ceniza, sales y material particulado en los tubos y superficies de transferencia de calor, lo que disminuye su eficiencia térmica y puede derivar en fallas operativas graves.

A partir de la década del 1960 comenzaron a implementarse los deshollinadores o “sootblowers”, equipos diseñados para limpiar internamente las superficies de las calderas mediante chorros de vapor o aire comprimido, estos equipos han evolucionado en el tiempo de ser manuales y de ciclo fijo, a ser automatizados y controlados electrónicamente, lo cual permite una limpieza más eficiente.

Es un equipo muy importante dentro de la caldera ya que garantiza su limpieza continua de las superficies de intercambio de calor (paredes tubulares, bancos generadores, sobrecalentadores y economizador), cuando las superficies se ensucian incrementan la resistencia térmica.

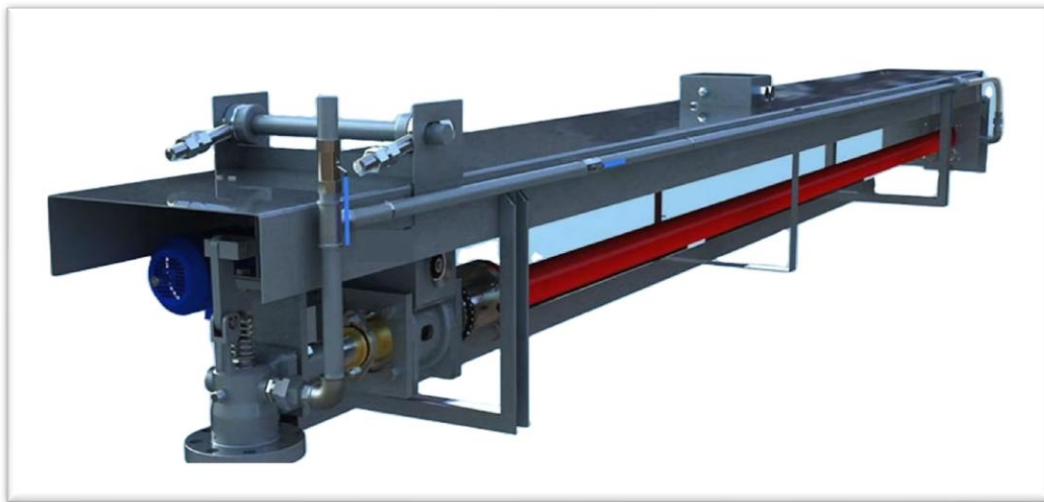


Figura 4.3 Deshollinador Industrial (Sootblowers)

Fuente: Manual Clyde Industries

Cuando las superficies se ensucian incrementan la resistencia térmica, esto provoca:

- Menor producción de vapor para la misma cantidad de combustible.
- Aumento del consumo específico de combustible o vapor.
- Mayor temperatura de gases y puntos calientes en tubos que pueden llevar a la degradación acelerada, fisuras o rupturas.
- Disminución de la carga particulada que llega a los precipitadores.

Debido a que estos equipos están en constante uso, en condiciones de altas temperaturas, suelen fallar bastante. Se les ha aplicado un sistema de mantenimiento a la falla y se ha identificado la necesidad de aplicar nuevas tecnologías del mantenimiento, con el objetivo de aumentar su confiabilidad y disponibilidad, Esto se basa en las políticas de CMPC sobre la mejora continua y minimizar las paradas no programadas.



Figura 4.4 Mantenimiento a Deshollinadores
Fuente: Siming LTDA

4.6 Descripción mecánica del Sistema.

"La arquitectura mecánica del deshollinador retráctil, específicamente el modelo Diamond Power IK-700, está diseñada para operar en uno de los entornos más hostiles de la planta de celulosa. Este sistema constituye un conjunto electromecánico de alta precisión que debe garantizar el avance, rotación y retracción de una lanza metálica sometida a temperaturas extremas y ambientes corrosivos. A continuación, se describen los componentes principales.

- Motor Eléctrico: Se compone de acero al carbono, su función principal es transmitir el movimiento al reductor, potencia de 2 Hp, frecuencia de 50 Hz, 950 RPM, Voltaje de 380 volt, peso de 45kg y una longitud de 450mm, Acoplado a la caja de reducción de velocidades por medio de un franje conforme a las normas ABNT – PB – 38.

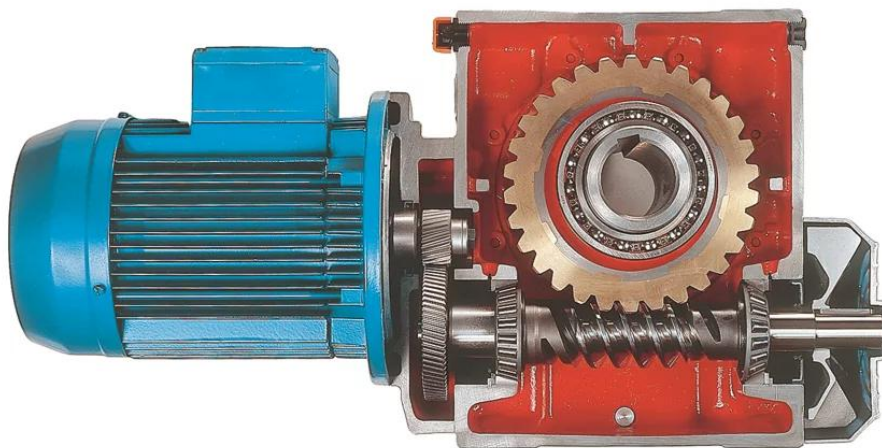


Figura 4.5 Motor Eléctrico
Fuente: Manual Clyde Industries

- Reductor: Los reductores adaptan la potencia y velocidad del motor eléctrico a los requerimientos del deshollinador en dos funciones principales:
 - Accionamiento de rotación de la lanza.
 - Accionamiento de la retracción/avance de la lanza.

El movimiento de avance de la lanza se realiza a través de un sistema de piñón y cremallera, su velocidad y revoluciones pueden ser seleccionadas en el punto deseado, esto varía según cada posición del deshollinador en la caldera.



Figura 4.6 Caja Reductora

Fuente: Manual Clyde Industries

- Cajón o Bancada: El cajón o bancada constituye la estructura portante del deshollinador y actúa como la guía de precisión para el ciclo de traslación del carro. Sus especificaciones técnicas responden a la necesidad de soportar esfuerzos de flexión y torsión bajo condiciones de alta temperatura radiante.
- Es fabricado de un material de acero al carbono SAE1045 , Su función principal es soportar la lanza del equipo, tiene una soldadura con tratamiento térmico, peso 1700kg y longitud de 9000mm. La bancada posee la inercia necesaria para mantener la estabilidad del equipo durante la extensión máxima de la lanza (voladizo), evitando vibraciones que podrían dañar los sellos de la pared de la caldera.

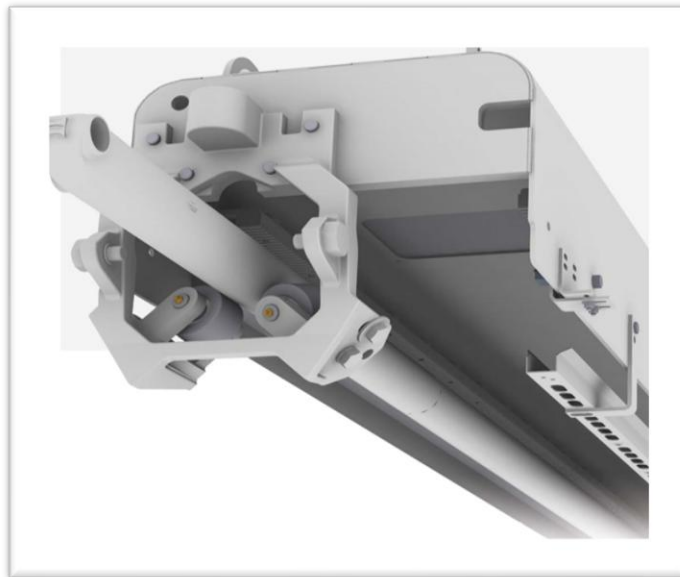


Figura 4.7 Cajón o bancada
Fuente: Manual Clyde Industries

- Lanza: Es el tubo que ingresa al interior de la caldera, para soplar con vapor de limpieza, en su extremo se encuentran las boquillas de soplado que genera el chorro para la limpieza interior, usualmente son 2 boquillas con diseño Venturi para su máximo impacto de chorro su material es un acero aleado resistente a altas temperaturas y corrosión, el avance de una lanza puede variar entre 0,5m hasta 11m, esto varía según diseño y ubicación del deshollinador.
- Barrer los depósitos adheridos
- Retracción segura fuera del horno cuando no está en uso para protegerse de las altas temperaturas de los gases.



Figura 4.8 Lanza
Fuente: Manual Clyde Industries

- **Boquilla:** La boquilla es un elemento importante, está ubicado en la punta de la lanza, su función es convertir la energía de vapor o aire en un chorro de alta velocidad que limpia las superficies internas de la caldera, su presión de vapor es de 20 – 45 bar, puede ir atornillada o soldada en la punta de la lanza.

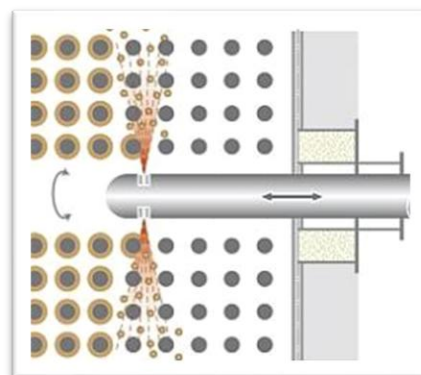
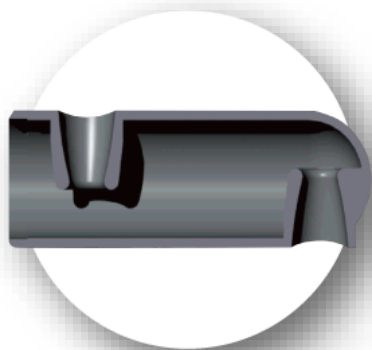


Figura 4.9 Boquilla
Fuente: Manual Clyde Industries

- **Guías de Lanza:** Son elementos de soporte fijos o semimóviles que tienen como función estructural mantener la coaxialidad y rigidez transversal del tubo de la lanza de soplado a lo largo de su recorrido. Actúan como puntos de apoyo intermedios para minimizar el voladizo (cantiléver) del tubo durante la extensión.



Figura 4.10 Guías de lanza
Fuente: Manual Clyde Industries

- Válvula Poppet: La válvula Poppet es un tipo de válvula de asiento de apertura y cierre rápido en condiciones de alta presión y temperatura de vapor. Utiliza un disco y asiento soldados flexibles, diseñados para resistir la distorsión por el estrés térmico constante (cambios bruscos de temperatura) y asegurar un cierre hermético libre de fugas a largo plazo. Su función principal es controlar la inyección de vapor de limpieza hacia la lanza de soplado, permitiendo que el vapor entre únicamente cuando la lanza está en la posición correcta frente a los tubos de caldera.

La válvula está integrada al conjunto del carro del soplador y se sincroniza directamente con el movimiento de la lanza para abrir y cerrar en los puntos de inyección predeterminados.

Los sopladores de hollín retráctiles largos requieren periódicamente ajustes de la presión del cabezal para lograr los niveles de presión de vapor deseados para la limpieza. Históricamente, para ajustar la configuración de la presión del cabezal, las válvulas de asiento estándar tenían que cerrarse/aislarse y el soplador de hollín a menudo se apagaba en todo el banco. La válvula de asiento con control de presión ajustable externamente (EAPC) se inventó para resolver este problema.

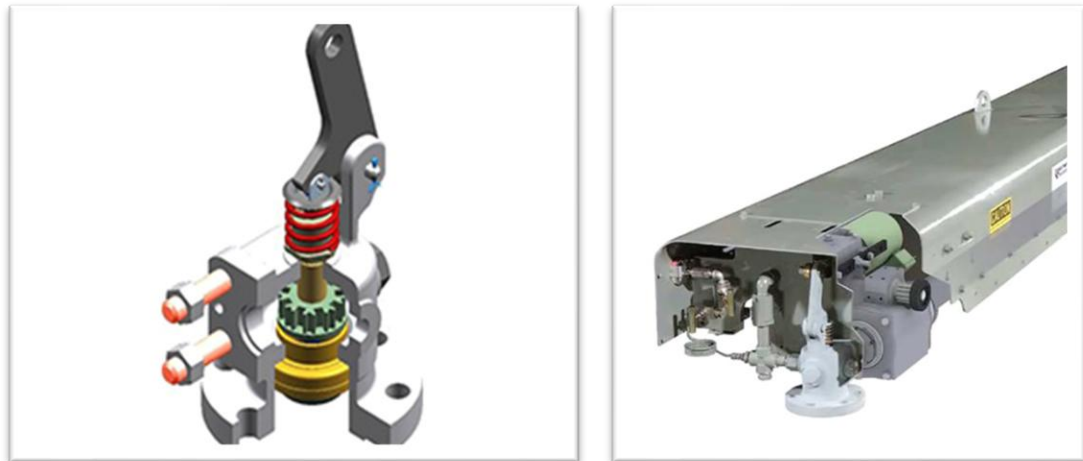


Figura 4.11 Válvula Poppet
Fuente: Manual Clyde Industries

- Prensa Estopas: La prensa estopa es un conjunto de sellado dinámico ubicado en el tubo de alimentación, esencial para contener el vapor sobrecalentado y presurizado dentro del tubo de alimentación, evitando que se escape a la atmósfera o al exterior del soplador mientras la lanza se desplaza
Este componente es crítico porque una falla en el sellado resulta en una pérdida directa de vapor, lo que se traduce en pérdida de eficiencia energética.



Figura 4.12 Prensa Estopa
Fuente: Manual Clyde Industries

- Empaquetadura de Prensa Estopa: Es un sello dinámico fabricado con materiales específicos para soportar el vapor sobrecalentado de alta presión y las altas temperaturas de operación de la caldera. Su función principal es evitar fugas de vapor desde el tubo de alimentación del soplador de hollín



Figura 4.13 Empaquetadura de Prensa Estopa
Fuente: Manual Clyde Industries

- Tubo de alimentación: El Tubo de Alimentación es el conducto tubular estacionario y de alta rigidez que forma el último tramo de la tubería de suministro de vapor antes de transferir el medio de soplado a la Lanza de Soplado móvil. Se posiciona coaxialmente respecto a la lanza y sirve como cámara de presión primaria para el conjunto de la válvula Poppet y la Prensa Estopas. Su función principal es garantizar un flujo de vapor estable y presurizado hacia la lanza. Su diseño se centra en maximizar la resistencia superficial y dimensional.



Figura 4.14 Tubo de Alimentación
Fuente: Manual Clyde Industries

- Caja de control: El soplador de hollín IK-700 puede cumplir con los estándares NFPA para la protección de arco eléctrico. Hermética al agua y al polvo, y totalmente compatible con los estándares de evitación de descargas eléctricas de OSHA, la caja de control se puede montar en cualquier punto a lo largo de la viga o en un lugar alternativo para mayor comodidad y seguridad. El soporte simple y el sistema de fuente de alimentación de conexión rápida permiten que la caja de control se envíe y monte por separado, lo que reduce los costos de envío y el riesgo de daños.



Figura 4.15 Caja de Control
Fuente: Manual Clyde Industries

4.7 Deshollinador Diamond Power IK-700

El soplador de hollín retráctil Diamond Power IK-700, está diseñado específicamente para un menor mantenimiento, fiabilidad, versatilidad y máximo rendimiento de limpieza.

Se puede utilizar en el sobrecalentador colgante de la caldera, las placas de sección de convección y el economizador.

Las características estándar del soplador de hollín retráctil IK-700 están diseñadas con un énfasis en el ROI, la durabilidad de larga duración y menor mantenimiento. Respaldado por un servicio líder en la industria, el soplador de hollín IK-700 es la solución para las demandas actuales de limpieza de calderas.

Características y Beneficios:

- Menor mantenimiento
- Fiabilidad
- Retorno de la inversión
- Seguridad
- Piezas intercambiables con otros modelos.

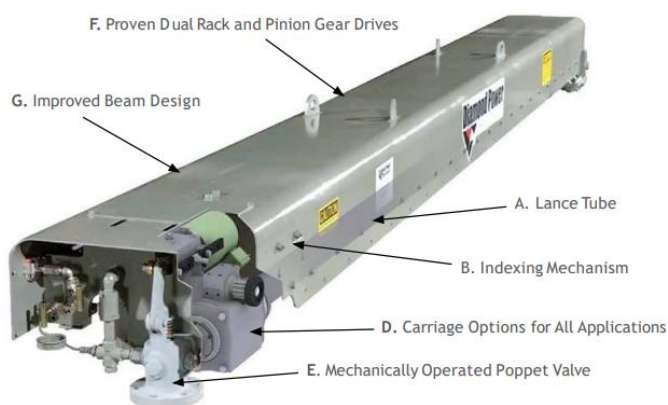


Figura 4.16 Deshollinador IK-700

Fuente: Manual Babcock & Wilcox

4.7.1 Características Técnicas:

Características técnicas	
Cobertura del soplador	Hasta 45 pies - 6 pulgadas (13,9 m)
Configuraciones de carro	Disponible en una variedad de velocidades, rotación y configuraciones para satisfacer los requisitos del cliente
Configuración del motor	Disponible en una variedad de caballos de fuerza, aislamiento, carcasa, voltaje y frecuencias para cumplir con los requisitos del cliente
Material del tubo de alimentación	Acero inoxidable 304 (los tubos de alimentación diamonizados® son opcionales)
Material del tubo de lanza	Disponible en una variedad de materiales y tamaños para satisfacer aplicaciones específicas
Fuente de alimentación	Sistema de cable PowerLink estándar con interruptores de límite de desplazamiento (cable Expanda opcional con interruptores de límite montados en haz)
Válvula de soplado medio (vapor o aire)	Diamond Power® poppet valve with removable flexible seat and disco y control de presión ajustable integral; los asientos de las válvulas son de cara dura
Limit switches	Los interruptores de proximidad y de límite mecánico están disponibles
Arreglos de montaje	Estándar de montaje de pivote; wallboxes disponibles para disparo de tiro presurizado o equilibrado

Figura 4.17 Características Técnicas Deshollinador
Fuente: Manual Babcock & Wilcox

- Diseño fiable de menor mantenimiento con puntos de lubricación mínimos.
- Acceso de mantenimiento incomparable con baja altura lateral y sin correas inferiores.
- Migración e intercambiabilidad de piezas con los modelos Diamond Power IK-525 e IK-545.
- Ha demostrado tener un excelente retorno de la inversión y una larga vida útil

En resumen, el IK-700 es un equipo de alto rendimiento y menor mantenimiento que ofrece una solución robusta y ajustable para el control de la escoria y el hollín en las calderas más grandes y exigentes.

4.8 Ciclo Operativo:

El deshollinador IK-700 opera bajo un ciclo programado y automatizado. Su función es remover depósitos de hollín y escoria mediante la inyección controlada de un medio de limpieza a alta presión.

Fase I: Preparación e Inicio:

Recepción de Orden de Arranque: El ciclo comienza cuando el sistema de control recibe una señal de arranque, basada en la programación horaria, las condiciones térmicas de la caldera o una orden manual del operador.

Verificación de Condiciones de Seguridad: El sistema confirma que los parámetros de la caldera (presión de vapor, temperaturas) se encuentran dentro de los límites seguros para iniciar el soplado.

Purga y Precalentamiento del Medio de Limpieza: Se abre una válvula de drenaje en la tubería de suministro. Esta acción permite purgar el condensado acumulado en la línea de vapor y precalentar la tubería y la válvula Poppet. Esto es crucial para evitar el choque térmico y el impacto de gotitas de agua en los tubos de la caldera.

Cierre de Drenaje: Una vez que la purga es completa (se confirma que solo sale vapor seco), se cierra la válvula de drenaje.

Fase II: Extensión y Soplado (Limpieza de Ida)

Apertura de la Válvula Poppet: Se abre la Válvula Poppet, permitiendo que el vapor o aire comprimido de alta presión fluya hacia el tubo de lanza. Se asegura que la presión de soplado sea óptima y ajustable externamente.

Extensión del Tubo de Lanza y Rotación: El motor de accionamiento activa el mecanismo de doble cremallera y piñón, impulsando el carro. El tubo de lanza comienza a extenderse hacia el interior de la caldera mientras simultáneamente rota.

Formación del Patrón Helicoidal: La combinación de traslación y rotación crea un patrón helicoidal de limpieza. Las boquillas en el extremo del tubo de lanza dirigen el chorro de alta velocidad para impactar y remover los depósitos de las paredes de los tubos.

Soplado Completo de Ida: El tubo de lanza realiza su avance, manteniendo el soplado, hasta alcanzar su posición de máxima extensión dentro del horno, asegurando la cobertura total de la zona asignada.

Fase III: Retracción y Finalización

Retracción del Tubo de Lanza y Soplado de Retorno: Una vez alcanzada la extensión máxima, el motor revierte el movimiento y el tubo de lanza comienza a retraerse. El soplado y la rotación se mantienen durante la retracción lo que a menudo contribuye a una limpieza más eficiente y completa.

Cierre de Válvula Poppet: Cuando el tubo de lanza está a punto de salir completamente del horno, la válvula Poppet se cierra automáticamente, deteniendo el consumo de vapor/aire.

Retracción Completa y Protección: El tubo de lanza se retrae completamente a su posición de almacenamiento. Esto lo aísla del ambiente de alta temperatura del horno, protegiendo su integridad estructural y las boquillas hasta el próximo ciclo.

Luego de haber cumplido con su labor el sistema registra la finalización exitosa del ciclo y el equipo queda en estado de espera



Figura 4.18 Deshollinador
Fuente: Siming LTDA

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y DISEÑO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO.

5.1 Análisis del plan de mantenimiento Actual:

El actual mantenimiento que la empresa le da a los deshollinadores es Mantenimiento Correctivo (CM), compuestas con actividades mínimas de mantenimiento preventivo. Esta metodología si bien reduce los costos de planificación iniciales se traduce en una alta dependencia de la reacción ante la falla.

Componentes del plan de mantenimiento Actual:

El mantenimiento de los equipos se ejecuta mediante una mezcla de acciones reactivas y unas pocas actividades preventivas básicas, tales como:

Inspecciones visuales: Se realizan inspecciones visuales periódicas todas las semanas, 2 veces por semana, por parte del personal de mantenimiento, para identificar fallas evidentes, tales como fugas de vapor por mal estado de empaquetaduras, ruidos extraños daños visibles en la lanza, esta medición no incluye la medición de parámetros técnicos ni de herramientas de diagnóstico.

Correcciones programadas: Se realizan algunos mantenimientos programados de acuerdo a la inspecciones visuales, por ejemplo, si en la inspección nos damos cuenta que hay una empaquetadura fugando debido a la alta presión y temperatura de vapor, de esta se da aviso y se cambia en unos días.

Mantenimiento correctivo de emergencia: La mayoría de las intervenciones se clasifican como correctivas ya que estas se llevan a cabo cuando se presenta la falla, por ejemplo un motor en mal estado, una lanza que se queda trabada dentro del deshollinador, una empaquetadura fugando vapor, etc.

Si bien el plan actual incluye elementos de mantención básica, la ausencia de un monitoreo basado en condición hace que el sistema dependa de la falla para actuar, lo que impacta negativamente la disponibilidad del equipo y resulta en el gasto descontrolado de costos de mantenimiento de emergencia y horas extras.

5.2 Historial de Fallas del deshollinador:

El registro y análisis sistemático de las fallas ocurridas durante el periodo anual 2025 constituye la base fundamental para la mejora continua del plan de mantenimiento. Este historial no solo representa un recuento de eventos disruptivos, sino que funciona como una herramienta de diagnóstico que permite identificar los modos de falla recurrentes.

La importancia de contar con un historial detallado radica en su capacidad para revelar la "vida útil real" de los componentes críticos. Al documentar cada intervención, se logra una visibilidad clara sobre qué elementos están fallando, con qué frecuencia y bajo qué condiciones operativas. Este análisis profundo es el que permite diferenciar entre fallas aleatorias y fallas sistémicas, proporcionando la evidencia necesaria para justificar cualquier ajuste en los planes de trabajo.

La siguiente tabla muestra las mantenciones necesarias para los 43 deshollinadores durante el año 2025.

Reporte Anual de Fallas Caldera Recuperadora N°1												 INGENIERÍA Y MANTENIMIENTO INDUSTRIAL	
Mantenciones	Ene.	Febre.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	TOTAL
Cambio de Empaquetadura de prensa	17	22	15	20	14	24	19	23	19	20	21	23	237
Mantenion de Reductor	2	1		2	1	1	2	1	2	2	1		15
Mantenion/ Reparacion de cremalleras	2	3	2	6	1	2	4	6	4	3	6	3	42
Lanza Doblada	3	4	2	2	3	1	2	1	3	4	2	5	32
Rodamientos	4	6	2	2	6	2	8	4	2	2	6	4	48
Mantenion Cadena o Tensor	3	2	1	2	2		3	2	2	4	5	5	31
v/v poppet	2		1			3		40					46
Mantenion de motor		1		1	2			1	1		1		7
Cambio de tubo Alimentador	1					2			1			1	5
Mantenion de Polines	4	3	2	5	4	6	4	2	4	5	4	4	47
Piñon		2		1	1			2	3			1	10
Bandeja	1				2			2			1		6

Tabla 5.1 Historial de Falla

Fuente: Siming LTDA

5.3 Programa semanal de Mantenimiento:

La programación semanal de mantenimiento representa la etapa de control operativo donde se asignan recursos específicos a tareas previamente definidas, asegurando que las intervenciones en los 43 sopladores IK-700 se realicen de manera ordenada y sin interferir con la continuidad del proceso térmico. A diferencia del plan anual, el programa semanal aterriza la carga de trabajo a la disponibilidad real de mano de obra, herramientas y ventanas de tiempo de operación.

La siguiente tabla detalla la planificación operativa para una semana tipo de mantenimiento. En ella se establecen las prioridades de intervención sobre la flota de sopladores IK-700, vinculando cada equipo con una tarea específica derivada del análisis de criticidad y asignando un tiempo estimado de ejecución

Area	Clase Orden	Nro Orden	Pto. Trab.	Cmpo. Clasif. UT	Nombre	Duración	Comienzo	Fin	Ejecutor
		0			REC QUIMICA	36,1 horas	lun 06-04-26 09:00	vie 10-04-26 13:06	
61	CE41	201309857 MRE1	061-21-045		R11S SEMANAL DESHOLLINADORES CR#1	20,2 horas	mar 07-04-26 11:12	jue 09-04-26 15:24	
261	CE41	201309596 MRE2	061-21-045	261	R11S SEMANAL DESHOLLINADORES CR#2	20,2 horas	lun 06-04-26 09:00	mié 08-04-26 13:12	
69	CE41	201310688 MCB1	069-21-050		R11S SEMANAL DESHOLLINADORES CB#1	20,2 horas	lun 06-04-26 09:00	mié 08-04-26 14:42	
369	CE41	201307100 MCB2	369-21-001		R11S SEMANAL DESHOLLINADORES CB#2	10,2 horas	lun 06-04-26 09:00	mar 07-04-26 11:42	
61	CE11	201462432 MRE1	061-21-068		MANT. EN INSTALACIÓN Y EMERGENCIAS SF1	7 horas	mar 07-04-26 16:00	mié 08-04-26 15:00	
261	CE11	201462625 MRE2	261-21-301		MANT. EN INSTALACIÓN Y EMERGENCIAS SF2	7 horas	jue 09-04-26 11:48	vie 10-04-26 10:48	
261	CE11	201462629 MRE2	261-21-301		CONTROL PRESIÓN DESHOLLINADORES CR2#01	7 horas	lun 06-04-26 09:00	lun 06-04-26 18:00	
61	CE11	201462424 MRE1	061-21-064		CAMBIO DE V/V POPPET (P) #02	5 horas	lun 06-04-26 09:00	lun 06-04-26 14:00	
61	CE11	201462433 MRE1	061-21-228		REPARACIÓN LÍNEA VAPOR LIMPIEZA (P) #39	5 horas	mar 07-04-26 11:00	mar 07-04-26 16:00	
61	CE11	201462624 MRE1	061-21-230		CAMBIO EMP PRENSA ESTOPA (P) #41	5 horas	lun 06-04-26 14:00	mar 07-04-26 11:00	
61	CE11	201462624 MRE1	061-21-060		CAMBIO EMP PRENSA ESTOPA (P) #13	5 horas	lun 06-04-26 14:00	mar 07-04-26 11:00	
261	CE11	201462630 MRE2	261-21-353		CAMBIO DE RETENES REDUCTOR (P)#53	5 horas	lun 06-04-26 16:00	mar 07-04-26 13:00	
261	CE11	201462631 MRE2	261-21-363		CAMBIO DE PACKING (P) #63	5 horas	mar 07-04-26 13:00	mie 08-04-26 10:00	
261	CE11	201455304 MRE2	261-21-308		CAMBIO DE REDUCTOR (P) #08	4,8 horas	mié 08-04-26 10:00	mié 08-04-26 14:48	
261	CE11	201462635 MRE2	261-21-397		CAMBIO Y MAN CAJÓN POLINES (P)#97	5 horas	mié 08-04-26 14:48	jue 09-04-26 11:48	
261	CE11	201462635 MRE2	261-21-398		CAMBIO Y MAN CAJÓN POLINES (P)#98	5 horas	mié 08-04-26 14:48	jue 09-04-26 11:48	
69	CE11	201462636 MCB1	069-21-052		CAMBIO DE V/V POPPET (P) #03	5 horas	mar 07-04-26 09:00	mar 07-04-26 14:30	

Tabla 5.2 de Programación Semanal de Mantenimiento

Fuente: Siming LTDA

5.4 Principales Fallas:

Atascamiento o Bloqueo del Tubo de Lanza: Es la falla más común y crítica. El tubo de lanza no puede extenderse completamente o, peor aún, se detiene o se atasca durante la retracción. Si el tubo queda atascado dentro del horno, existe un riesgo de daño permanente por sobrecalentamiento y la necesidad de una parada de emergencia para su extracción.

Exceso de Ruido o Vibración durante el Ciclo: El operador reporta ruidos audibles anómalos (golpeteo, chirrido, traqueteo) y una vibración visible y perceptible en la viga o el carro. Aunque el equipo pueda terminar el ciclo, este síntoma indica un daño avanzado inminente en rodamientos o engranajes.

Fugas Críticas de Vapor o Aire: Fugas visibles de vapor en la caja de pared, la válvula Poppet, o en el tubo de alimentación. Las fugas afectan directamente la presión disponible en la boquilla, resultando en una limpieza ineficaz de la superficie de la caldera.

Rodamientos del Carro y la Carcasa: Esto ocurre cuando el esfuerzo cíclico excede la capacidad del material, especialmente bajo condiciones de carga elevada o vibración. La entrada de partículas o la degradación del lubricante causan corrosión y desgaste abrasivo, elevando la fricción interna.

Cremallera y Piñón: Desgaste Abrasivo o Deformación Plástica de los Dientes. Causada por el movimiento constante o el impacto con cuerpos extraños o escoria.

Motor Eléctrico de Accionamiento: Esta falla es de origen electromecánico y se relaciona directamente con el estrés térmico y las sobrecargas. Además, si el freno electromagnético se traba o si la lanza encuentra resistencia por deformación, el motor opera en una zona de sobre corriente (alto amperaje), lo que termina por quemar el componente si las protecciones del tablero no actúan a tiempo.

Polines: Esta falla se manifiesta por el desgaste abrasivo o el atascamiento de los rodillos que soportan y guían el movimiento de la viga o el carro. Debido a la acumulación de ceniza química y sales corrosivas de la caldera, los polines pierden su capacidad de giro libre, generando una fricción excesiva.

Reductor de Velocidad: El fallo en el reductor ocurre principalmente por la degradación térmica del lubricante o la contaminación con partículas sólidas. El esfuerzo cíclico y las altas temperaturas de la zona de la caldera provocan el desgaste de los dientes de los engranajes internos y la fatiga de los sellos de aceite (retenes). Una falla en el reductor inmoviliza por completo el equipo y, en casos de pérdida de lubricación, puede generar un bloqueo mecánico destructivo que afecta al eje motriz.

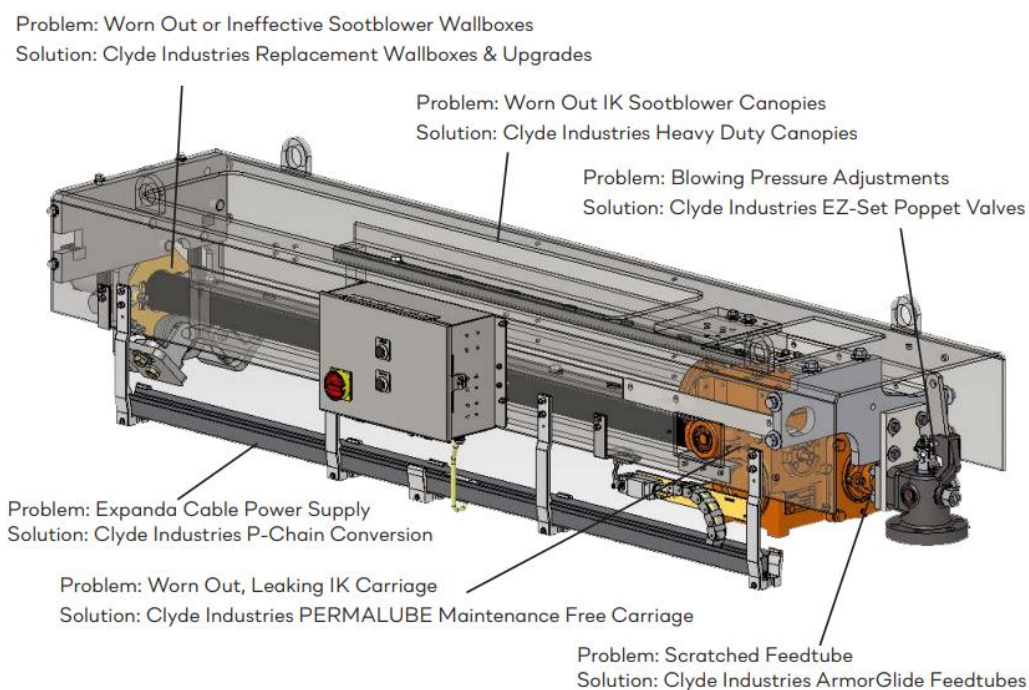


Figura 5.1 Fallas Sootblowers
Fuente: Manual Clyde Industries

5.5 Análisis de falla mediante diagrama de Ishikawa:

Para determinar las variables que inciden a la indisponibilidad del deshollinador, se procedió a la elaboración de un diagrama de Ishikawa (Causa-Efecto), Esta herramienta permite desglosar de manera sistemática los factores que comprometen la integridad de los componentes críticos.

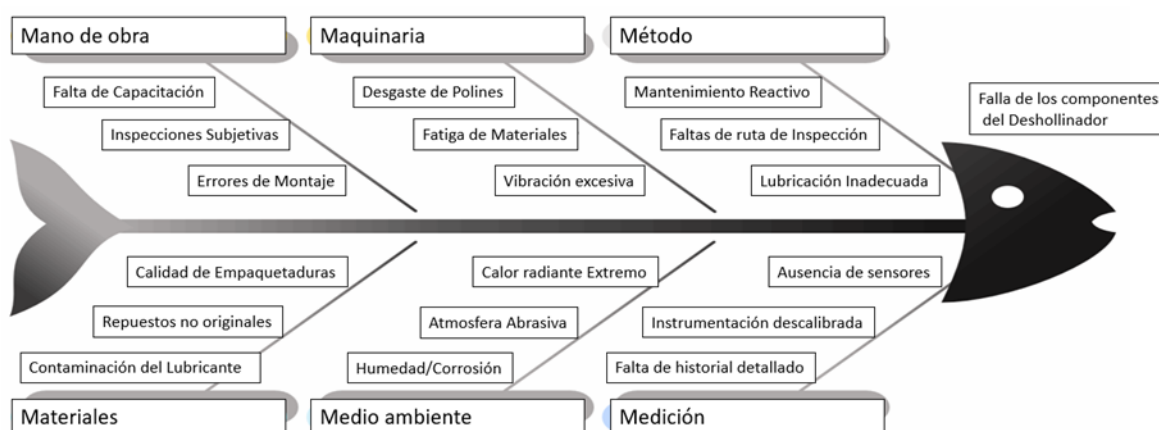


Tabla: 5.3 Análisis de falla
 Fuente: Elaboración Propia

El análisis sistémico representado en el Diagrama de Ishikawa confirma que la baja disponibilidad de los deshollinadores IK-700 no es producto de fallas aisladas, sino de una combinación crítica de factores operativos y de entorno. Se concluye que el Medio Ambiente agresivo de la caldera (calor radiante y ceniza abrasiva) actúa como un catalizador que acelera el desgaste de Materiales (empaquetaduras y rodamientos), superando la capacidad de respuesta del Método de mantenimiento actual.

En definitiva, el diagrama demuestra que sin una transición hacia herramientas de monitoreo predictivo (amperaje y ultrasonido) que mitiguen el error humano y la falta de datos en tiempo real, la planta seguirá operando bajo un esquema de alta incertidumbre y costos de reparación reactivos.

5.6 Matriz de Criticidad:

Esta matriz es crucial, ya que convierte el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) en una representación gráfica de la prioridad, al establecer la criticidad de los equipos es posible definir cuál es la mejor estrategia de mantenimiento a ser usada, su objetivo es mantener o aumentar la disponibilidad de las máquinas y reducir la frecuencia de fallas o paradas no planificadas en activos que deben funcionar a su máxima capacidad disponible.

Nuestra matriz de criticidad será evaluada por la frecuencia de fallos, donde se le asignara los siguientes valores:

Matriz de Criticidad del Deshollinador:

		Matriz de Criticidad						
		Consecuencia					Nivel de Criticidad	Color
Frecuencia		Minima	Menor	Moderada	Mayor	Maxima		
Muy alta	5	5	10	20	40	80	Riesgo Aceptable	
Alta	4	4	8	16	32	64	Riesgo Tolerable	
Media	3	3	6	12	24	48	Riesgo Alto	
Baja	2	2	4	8	16	32	Riesgo Extremo	
Muy Baja	1	1	2	4	8	16		

Tabla: 5.4 Matriz de criticidad

Fuente: Elaboración Propia

Fallas	Frecuencia	Consecuencia	Nivel de Criticidad
Empaquetadura Prensa estopa	Alta	Moderada	Riesgo Alto
Mantenión Reductor	Baja	Mayor	Riesgo Alto
Reparación Cremallera	Media	Máxima	Riesgo Extremo
Lanza Doblada	Media	Máxima	Riesgo Extremo
Rodamientos	Media	Mayor	Riesgo Alto
Mantenión Cadena o tensor	Baja	Mayor	Riesgo alto
Cambio Empaquetadura v/v Poppet	Muy baja	Menor	Riesgo Aceptable
Mantenión Motor	Baja	Máxima	Riesgo Extremo
Cambio de Tubo Alimentador	Media	Mayor	Riesgo Alto
Mantenión de Polines	Media	Moderada	Riesgo Alto
Piñón	Baja	Mayor	Riesgo Alto
Bandeja	Media	Mínima	Riesgo Aceptable

Tabla 5.5 Matriz de criticidad

Fuente: Elaboración Propia.

En conjunto, el hecho de que más del **75% de los modos de falla** analizados se encuentren en las categorías de **Riesgo Alto y Extremo** ratifica la necesidad crítica de migrar de un esquema de mantenimiento reactivo hacia un modelo **Predictivo basado en la Condición**. Esta estrategia es la única capaz de mitigar la severidad de las consecuencias "Mayores" y "Máximas" observadas en la matriz.

5.7 Análisis de falla y efectos de falla AMEF:

El Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) es una metodología sistemática utilizada para identificar y evaluar fallas potenciales, sus causas y sus efectos en el rendimiento del equipo. Su aplicación aquí tiene como objetivo priorizar las intervenciones de Mantenimiento en aquellos componentes del IK-700 que generan el mayor impacto operacional y económico (horas extras, paradas de emergencia).

Este análisis se ha aplicado al historial de mantenimiento recopilado durante un año. El objetivo es transformar los datos de frecuencia histórica en una matriz de riesgo cuantificable. Para ello, se han evaluado tres parámetros clave para cada modo de fallo:

- Gravedad (S): El impacto del fallo en la operación, la seguridad o el medio ambiente.
- Ocurrencia (O): La frecuencia con la que se ha presentado el fallo (basado en el registro anual).
- Detección (D): La dificultad para detectar el fallo antes de que genere su efecto.

La multiplicación de estos valores resulta en el Número de Prioridad de Riesgo ($NPR = S \times O \times D$), el cual nos permite clasificar y priorizar las acciones de mejora, enfocando los recursos donde el riesgo es máximo.

5.7.1 Tabla de Resultados del Análisis AMEF:

A continuación, se presenta la matriz de riesgo, con sus respectivos NPR, destacando los componentes más críticos.

Modo de Fallo (Causa)	Efecto del Fallo (Asumido)	S	O	D	NPR (S x O x D)	Acción de Mitigación Propuesta
Lanza Doblada	Atascamiento en caldera, daño crítico a tubos.	10	8	6	480	Inspección visual en ruta (Nivel 10-6) y control de temp.
Válvula Poppet	Baja eficiencia, fuga constante de vapor.	9	9	5	405	Implementar detección mediante Ultrasonido Acústico.
Mantención de Polines	Vibración, aumento de carga en el motor.	7	9	5	315	Limpieza en ruta de inspección y lubricación de alta temp.
Rodamientos	Ruido, vibración, daño avanzado inminente.	6	9	6	324	Análisis de vibraciones y sellado contra ceniza abrasiva.
Empaq. de Prensa	Fuga de vapor, pérdida de presión.	5	10	2	100	Estandarización de apriete y revisión de alineación.
Reparación Cremalleras	Fallo de posicionamiento, daño estructural.	8	8	5	320	Inspección y lubricación de alineación periódica en ruta.
Mantención de Reductor	Detención completa de la máquina.	9	5	7	315	Análisis de aceite y termografía regular en puntos críticos.
Mantención de Motor	Detención prolongada, costo de repuesto.	9	4	7	252	Monitoreo de condición (Amperaje) para detectar sobrecarga.
Cadena o Tensor	Salto de avance, pérdida de tracción.	7	7	4	196	Revisión de tensión y lubricación en ruta de inspección.
Tubo Alimentador	Fugas, rayado superficial del espejo.	6	4	8	192	Inspección técnica con boroscopio y pulido superficial.

Bandeja / Piñón	Fallas eléctricas o mecánicas de arrastre.	5	5	5	125	Revisión de alineación y limpieza de contaminantes.
--------------------	--	---	---	---	-----	---

Tabla 5.6 Resultados Análisis AMEF

Fuente: Elaboración Propia

5.7.2 Priorización según los resultados obtenidos:

De acuerdo con los resultados obtenidos en nuestro análisis AMEF, Se identificaron 2 tipos de riesgos primarios que deben ser mitigados mediante distintas aproximaciones metodológicas:

Riesgo por Criticidad de consecuencia: Los fallos de componentes más importantes como el motor, reductor, lanza, poseen una gravedad (S) elevada, esto implica parada de línea no programadas y además bastante prolongadas y con costos significativos, para abordar este problema podemos implementar un Mantenimiento basado en condición (CBM) mediante técnicas predictivas como análisis de vibraciones, termografía, análisis de aceite, Así permitiendo predecir la falla y planificar la intervención antes del colapso funcional.

Riesgo por Frecuencia de Ocurrencia: El riesgo asociado al cambio de empaquetadura de prensa destaca por su altísima ocurrencia, este patrón de falla recurrente no se resuelve con mantenimiento predictivo, sino con la eliminación de la causa raíz. La alta frecuencia de sustitución sugiere una mala calidad del material de la empaquetadura que quizás no está hecha para la temperatura de trabajo en la cual opera el deshollinador, además de que una mala instalación de las empaquetaduras puede afectar en su vida útil, entonces la estandarización del proceso de montaje sería fundamental.

El alto NPR de algunos componentes requieren una solución tecnológica, aplicando tecnologías de mantenimiento predictiva podríamos evitar que estas fallas ocurran de manera inesperada. Esto asegura que las intervenciones se centren en maximizar el impacto operativo y financiero de la inversión, de acuerdo con mi enfoque y los componentes que se ven afectados actuaremos de acuerdo con el riesgo de criticidad de consecuencia, ya que este enfoque me permite mejorar el mantenimiento de los componentes más importantes que me pueden detener el equipo de manera imprevista.

5.8 Diagrama de Jack Knife:

El Diagrama de Jack-Knife, una metodología de dispersión logarítmica que correlaciona el número de fallas (frecuencia) con el tiempo medio de reparación (MTR). A diferencia de otros métodos estadísticos, el Jack-Knife permite visualizar de forma simultánea qué componentes son responsables de las paradas más prolongadas y cuáles presentan una recurrencia excesiva. A continuación se presenta el diagrama de Jack Knife

Nombre del Equipo	N° Fallas	Tiempo de Falla(min)	MTTR
Válvula Poppet	46	12427	270,2
Empaq. De Prensa	237	10677	45,05
Lanza	32	9610	300,3
Cremallera	42	8845	210,6
Rodamientos	48	5772	120,3
Reductor	15	4568	304,5
Cadena o Tensor	31	3745	120,8
Polines	47	2866	60,98
Motor	7	1272	181,7
Tubo Alimentador	5	1058	211,6
Piñón	10	907	90,7
Bandeja	6	275	45,8
TOTAL	526	62022	
LIMITE	43,8		117,9

Tabla 5.7 Calculo MTTR
Fuente: Elaboración Propia

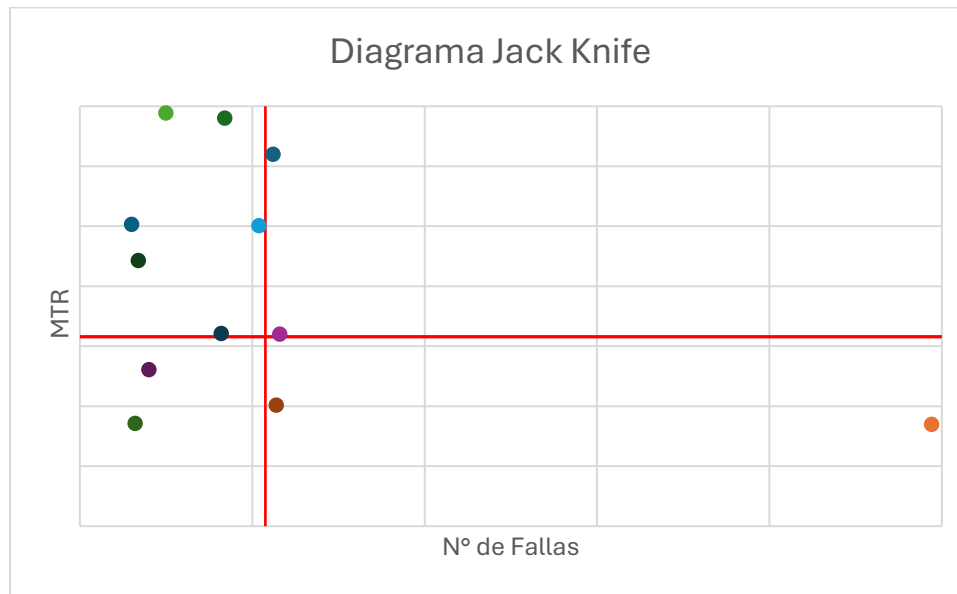


Diagrama 5.1 Jack Knife
 Fuente: Elaboración Propia

Se puede evidenciar que la disponibilidad de los deshollinadores está limitada por fallas crónicas (alto MTTR), concentradas en el cuadrante superior izquierdo. Al ser reparaciones de larga duración, se concluye que la estrategia debe priorizar el mantenimiento predictivo para detectar síntomas prematuros y planificar la intervención antes de la detención forzada.

5.9 Planificación del Mantenimiento:

La planificación del mantenimiento es un proceso fundamental que permite garantizar la eficiencia y continuidad operativa del equipo, Para ello se debe comenzar a generar una base de datos sólida, con un historial de falla de los equipos, y la descripción detallada de las tareas de mantenimiento, por eso pasaremos a diseñar formatos específicos que detallen el paso a paso a seguir al momento del equipo presentar una falla.

Los principales documentos propuestos para el registro y planificación son:

- Ruta de Inspección
- Pauta de Trabajo
- Check List

5.9.1 Ruta de Inspección de los equipos:

Con el objetivo de garantizar la disponibilidad mecánica de los sistemas de limpieza y optimizar la transferencia de calor en la caldera recuperadora, se ha diseñado una ruta de inspección programada. Esta abarca desde el piso 10 hasta el piso 6, cubriendo un total de 43 deshollinadores. La ruta no solo busca estandarizar el recorrido del personal técnico, sino también establecer puntos de control críticos que permitan transitar de un esquema correctivo hacia un esquema preventivo y predictivo, minimizando el impacto del hollín en los niveles de producción.

Además como se identificó en el diagrama de Ishikawa previamente presentado, la falta de una ruta clara era una causa raíz de las fallas.

La secuencia de inspección se ha estructurado bajo un criterio descendente, iniciando en el piso 10 de la caldera (Zona de supercalentadores) y concluyendo en el piso 6 (Zona de economizadores).

Esta lógica de recorrido responde a dos factores fundamentales:

La optimización del desplazamiento del personal técnico y la criticidad térmica del equipo. Al comenzar por los niveles superiores, se prioriza la revisión de deshollinadores expuestos a las mayores temperaturas de gases de combustión, donde el riesgo de deformación de lanzas y fallas de válvulas Poppet es significativamente mas alto debido al estrés térmico ambiental.

5.9.2 Distribución de los equipos en la ruta de inspección:

Piso	Zona de la Caldera	Cant. Estimada	Tipo de Equipo Común
Piso 9 - 10	Supercalentadores	10	Retráctiles Largos
Piso 8 - 7	Banco de Generación	18	Retráctiles / Giratorios
Piso 6	Economizadores	15	Giratorios / Fijos

Tabla 5.8 Distribución de deshollinadores en la caldera
Fuente: Elaboración Propia

5.9.3 Criterios técnicos y Puntos de inspección por equipo:

Se han definido criterios técnicos basados en la criticidad de los componentes, la inspección se divide en tres áreas fundamentales que garantizan la movilidad del equipo, la efectividad del soplado y la seguridad del sistema. El objetivo de este desglose es permitir que el personal técnico identifique anomalías visuales o auditivas de forma precisa sin que se le pase ningún detalle por alto, asegurando que cada unidad opere dentro de sus parámetros de diseño.

1. Sistema Mecánico:

- Lanza (Tubo de soplado): Se debe verificar visualmente la rectitud. Una lanza curvada indica estrés térmico o falla en los soportes internos de la caldera, lo que puede ocasionar que el equipo se trabaje.
- Carro de Desplazamiento: Inspección de niveles de lubricante y detección de ruidos anormales. Un rodamiento defectuoso en el carro incrementa el consumo de corriente del motor y genera vibraciones.
- Cadenas y Cremallera: Se verifica la tensión y la presencia de partículas metálicas que indiquen un desgaste prematuro por falta de lubricación o desalineación.
- Soportes y Polines Externos: Revisión de la fijación de los pernos y limpieza de los rieles. La acumulación de ceniza en las guías puede desviar la trayectoria del equipo
-

2. Sistema de Vapor:

- Válvula Poppet: Una fuga constante de vapor erosiona el asiento de la válvula y, peor aún, puede desgastar por chorreo los tubos de la caldera cercanos a la boquilla.
- Empaquetaduras: Una empaquetadura seca o desgastada permite el escape de vapor hacia el exterior, reduciendo la presión de soplado efectiva.
- Boquillas de Soplado: Aunque es una inspección interna, se verifica desde el exterior que no existan retrocesos de gases de combustión hacia el equipo, lo cual indicaría una falla en el aire de purga o sellado.

3. Sistema Eléctrico:

- Interruptores de Límite: Verificación de limpieza y ajuste físico. Se debe asegurar que las levas de activación no estén flojas, garantizando que el equipo se detenga exactamente en los puntos de inicio y fin de carrera.
- Motor Eléctrico y Conexiones: Inspección visual del cableado. Debido a las altas temperaturas en los niveles 10 al 8, el aislamiento tiende a cristalizarse; se deben buscar grietas o signos de sobrecalentamiento en la bornera.
- Caja de Control: Verificación de que el selector esté en modo "Remoto" para la operación desde la sala de control, y que no existan luces de falla activas en el tablero.

Subsistema / Componente		Ítem de Inspección	Tipo de Inspección	Estado (B / R / M)	Observación / Valor Medido
1. SISTEMA ELÉCTRICO Y CONTROL	Motor Eléctrico	Consumo de corriente (Amperaje)	Predictiva		
	Caja de Control	Estado de cables y canalizaciones	Visual		
	Limit Switches	Funcionamiento de fines de carrera	Operacional		
2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN	Caja Reductora	Vibración Global (Puntos de apoyo)	Predictiva		
	Caja Reductora	Nivel y color del aceite	Visual		
	Engranajes / Piñones	Estado de dientes y lubricación	Visual		
	Acoplamientos	Alineación y presencia de holguras	Visual / VIB		
3. SISTEMA DE PROPULSIÓN	Cajón de Polines	Giro libre y desgaste de rodillos	Visual / Táctil		
	Cadena / Cremallera	Tensión y limpieza de suciedad	Visual		
	Carro Motriz	Desplazamiento y ruidos de rodaje	Auditiva		
4. SISTEMA DE SOPLADO Y SELLADO	Prensa Estopa	Temperatura en cámara de sellado	Termografía		
	Prensa Estopa	Fugas de vapor (Siseo/Goteo)	Ultrasonido / Vis.		
	Válvula Poppet	Estanqueidad del asiento de válvula	Ultrasonido		
	Tubo de Alimentación	Estado de superficie y alineación	Visual		
5. ESTRUCTURA Y LANZA	Lanza	Rectitud y señales de pandeo	Visual		
	Lanza	Limpieza (Acumulación de ceniza)	Visual		
	Soportes / Vigas	Corrosión y apriete de pernos	Visual		

Tabla 5.9 Puntos de Inspección del equipo
Fuente: Elaboración Propia

5.10 Mantenimiento Preventivo recomendado para el equipo:

Los deshollinadores son equipos robustos pero su exposición a ceniza abrasiva y altas temperaturas exige una rigurosidad en las tareas de mantenimiento preventivo.

Inspecciones Visuales:

Se realizan con bastante frecuencia dentro de la semana, es una tarea de verificación de integridad, para asegurar la disponibilidad del equipo. Se realizan tareas como:

Inspección de la lanza: Se observa la lanza para detectar una deformación en la lanza, Una deformación o curvatura excesiva significa fatiga térmica. De igual forma verificar los rodillos de la lanza que estén alineados y giren libremente.

Inspección de la parte móvil: Inspeccionas dientes de la cremallera, dientes gastados pueden provocar el bloqueo del equipo. Buscar eslabones oxidados de la cadena de accionamiento.

Sistema de Fluidos: Verificar que la válvula Poppet no tenga fugas de vapor, Observar las empaquetaduras de la válvula Poppet.

Lubricación Programada: Se realiza una lubricación a caja de engranajes, la cremallera, los rodamientos del cajón.

Ajustes Mecánicos: Se realiza un reapriete preventivo de las tuercas en general del equipo, se revisa la tensión de las cadenas, se alinea la lanza y se revisa la presión de la válvula Poppet

Limpieza del Equipo: Eliminación de depósitos de ceniza y grasa vieja, La acumulación de residuos actúa como abrasivo que desgasta los componentes del carro móvil.

Inspección de Switches de Límite: Se verifica la limpieza y el ajuste mecánico de las levas de accionamiento. La acumulación de ceniza en los contactos o el desplazamiento de las levas puede causar que el carro no se detenga en su posición de reposo, provocando un bloqueo mecánico o el daño del motor.

Ajuste del Seguidor de Prensa: Se realiza un apriete gradual y uniforme de las tuercas de prensa estopa. Un ajuste excesivo genera fricción que raya el tubo alimentador, mientras que uno insuficiente provoca fugas de vapor que erosionan la lanza.

5.11 Tecnologías de Mantenimiento Predictivo:

A diferencia del mantenimiento preventivo, el enfoque predictivo utiliza herramientas de diagnóstico no destructivas para evaluar la condición mecánica y operativa del equipo mientras este se encuentra en servicio.

La implementación de estas tecnologías busca optimizar la disponibilidad del deshollinador LK-700, reduciendo la dependencia de inspecciones subjetivas y evitando el mantenimiento reactivo que compromete la eficiencia de la caldera.

Componente Crítico	Modo de Falla	Tecnología PdM	Frecuencia Sugerida
Caja Reductora	Desgaste de rodamientos	Análisis de Vibraciones	Mensual
Prensa Estopas	Fuga de vapor	Termografía Infrarroja	Quincenal
Válvula Poppet	Asiento dañado	Ultrasonido Acústico	Mensual
Cajón de Polines	Rodillo trabado	Inspección Visual / Vibración	Semanal
Motor Eléctrico	Sobrecarga / Bobinado	Análisis de Corriente	Trimestral

Tabla 5.10 Mantenimiento Predictivo para el deshollinador

Fuente: Elaboración Propia

5.11.1 Vibroanálisis: Protocolo de Medición de puntos críticos en IK-700:

Al recolectar y analizar el espectro vibratorio, es posible predecir fallas mecánicas con semanas de anticipación, lo que resulta fundamental para mitigar las detenciones prolongadas detectadas en el análisis Jack-Knife y asegurar la integridad estructural del equipo durante su operación.

Las mediciones deben realizarse en puntos donde la transmisión de energía mecánica de los componentes internos sea más directa hacia la carcasa.+

Punto de Medición	Ubicación Física	Falla Detectable
Punto 1: Motor Eléctrico (Lado Acople)	Carcasa del motor, extremo eje de salida.	Desalineación, desbalanceo del rotor y fallas eléctricas.
Punto 2: Caja Reductora (Entrada)	Soporte del eje de entrada del carro (Gearbox).	Desgaste en el piñón de ataque y rodamientos de alta velocidad.
Punto 3: Caja Reductora (Salida)	Zona del eje que mueve la cremallera/piñón.	Holgura en engranajes de baja velocidad y deformación de dientes.
Punto 4: Soporte del Carro (Rodillos)	Estructura de apoyo sobre la viga principal.	Soltura mecánica y desgaste de los rodillos de guía.
Punto 5: Soporte Central (Sopladores >7.6m)	Rodamientos del soporte articulado de la lanza.	Deflexión de la lanza (bowing) por exceso de calor.

Tabla 5.11 Puntos de Medición Vibroanálisis

Fuente: Elaboración Propia

5.11.2 Protocolo de Inspección: Cámara Termográfica:

El protocolo de inspección mediante cámara termográfica tiene como objetivo la detección temprana de anomalías térmicas sin necesidad de contacto físico ni detención del equipo. Al integrar este protocolo, se transforma la inspección visual subjetiva en un diagnóstico basado en datos precisos de temperatura, facilitando la planificación de reparaciones y aumentando la seguridad operativa de la planta.

Punto de Inspección	Qué buscar (Hallazgo)	Importancia en la Caldera
Prensa estopa	Fugas de vapor (puntos brillantes).	Evita la pérdida de presión de soplado y protege el carro del vapor corrosivo.
Carcasa de la Caja Reductora	Calor excesivo por fricción.	Detecta falta de lubricación o engranajes desalineados que generan calor antes que ruido.
Motor Eléctrico	Desequilibrio térmico en bobinados.	Previene la quema del motor por sobreesfuerzo al mover la lanza.
Tablero de Control Local	Conexiones sueltas (Efecto Joule).	Evita paradas por fallas eléctricas simples que detienen toda la secuencia de deshollinado.
Válvula de Admisión (Poppet Valve)	Fugas de vapor en asiento de válvula.	Una válvula que “pasa” vapor calienta la lanza innecesariamente cuando está en reposo, doblándola.

Tabla 5.12 Puntos de Inspección Termografía
Fuente: Elaboración Propia

5.12 Integración de Tecnologías de Monitoreo de Condición (PdM):

La implementación de las tecnologías descritas en la tabla anterior marca la transición de una estrategia basada en intervalos de tiempo a una basada en la condición real del equipo. El mantenimiento predictivo nos permite intervenir el deshollinador IK-700 únicamente cuando los síntomas de falla son detectados, optimizando la vida útil de cada componente.

A diferencia del preventivo tradicional, donde se cambian piezas que aún podrían tener vida útil, el PdM en este proyecto busca:

1. Extensión de la Vida Útil de Componentes Críticos:

A diferencia del mantenimiento preventivo, que a menudo sustituye piezas basándose en un calendario (pudiendo desechar componentes con un 30% o 40% de vida útil remanente), el PdM permite utilizar el componente hasta que su curva P-F (punto de falla potencial a falla funcional) indique que el riesgo es inaceptable.

2. Eliminación de la "Falla Infantil" por Intervención:

Existe un riesgo estadístico de que un equipo falle justo después de ser intervenido debido a errores de montaje, lubricación inadecuada o repuestos defectuosos.

3. Optimización de la Gestión de Inventario:

El monitoreo constante permite predecir con semanas de antelación cuándo fallará un rodamiento o una válvula Poppet. Esto permite al área de adquisiciones comprar los repuestos necesarios exactamente cuándo se detecta el síntoma de falla, evitando tener capital inmovilizado en bodega, repuestos de baja rotación y asegurando que el repuesto esté disponible antes de la parada programada.

4. Mejora en la Eficiencia Térmica de la Caldera:

Un deshollinador que falla y deja de operar provoca una acumulación de ceniza en los tubos de la caldera, lo que reduce la transferencia de calor y aumenta el consumo de combustible. El PdM garantiza que los equipos estén disponibles la mayor parte del tiempo. Al mantener los tubos limpios gracias a un sistema confiable, se optimiza el ciclo térmico y se reducen las emisiones de gases por ineficiencia.

5. Seguridad Proactiva y Medio Ambiente:

Las fugas de vapor en la prensa estopas o la válvula Poppet no solo son ineficientes, sino que representan un riesgo de quemaduras graves para el personal y un impacto acústico ambiental. La termografía y el ultrasonido permiten detectar estas fugas cuando son microscópicas, permitiendo una corrección controlada antes de que se conviertan en una emergencia de seguridad que obligue a una parada de planta no programada.



Figura 5.2 Termografía en Terreno
Fuente: Siming LTDA

5.13 Plan de Lubricación por componente:

La lubricación es muy importante dentro del mantenimiento del equipo para mitigar el desgaste por fricción mecánica, la corrosión ambiental y los efectos del gradiente térmico severo al que están sometidos los elementos móviles del deshollinador IK-700, A continuación, se detalla el protocolo de chequeo de lubricación y el producto para cada componente:

Componente	Frecuencia	Producto
Cadenas	Diarias	Chesterton 601
Tensor cadena	Diarias	Mobilith 220
Caja de transmisión	Diarias	Mobilith CHC 220
Reductores	Diarias	Móvil gear SHC 220
Cremalleras	Semanal	Chesterton 715

Tabla 5.13 Chequeo de Lubricación

Fuente: Informe CMPC

• Reductores y Caja de transmisión (Mobilgear SHC 220 / Mobilith SHC CHC 220):

Son sistemas cerrados (carcasas con aceite adentro). El aceite dura meses o incluso un año operando ahí dentro. El chequeo diario consiste en mirar la mirilla de vidrio para constatar que el nivel esté correcto y que el aceite no haya cambiado de color (lo que indicaría contaminación con agua o vapor). Solo se rellena si hay una fuga.

• Cadenas y Tensores (Chesterton 601 / Mobilith SHC 220):

Al ser componentes abiertos expuestos al calor de la caldera, el lubricante se evapora o se contamina con la ceniza más rápido. El chequeo diario verifica que mantengan una película brillante de lubricación. Su aplicación real suele programarse de manera automática (por goteo/espray) o manual una o dos veces por semana, dependiendo de la severidad del área.

• Cremalleras (Chesterton 715):

Al ser un engranaje abierto expuesto directamente a la radiación de la caldera, la grasa se va perdiendo por el movimiento y el calor. Se chequea y se aplica semanalmente, previa limpieza de la costra de ceniza vieja.

5.14 Formato de registro de ruta de Inspección:

Este documento constituye el pilar operativo del mantenimiento en terreno, permitiendo una vigilancia constante sobre los componentes críticos identificados previamente en la matriz de criticidad.

Se Define un Check-list exhaustivo que obliga al personal técnico a verificar cada componente clave (Válvula Poppet, Lanza, Caja Reductora, Motor, Polines, etc.), evitando omisiones y garantizando que cada equipo reciba el mismo nivel de atención técnica. Además de la inspección, el formato registra labores de mantenimiento menor y limpieza (vaciado de bandejas, ajuste de prensa estopas, lubricación), las cuales son esenciales para mitigar los efectos del ambiente agresivo (ceniza y alta temperatura) sobre los componentes mecánicos.

MES: _____ SEMANA: _____ FECHA: ____/____/____		RESPONSABLE RUTA: _____ CAPATAZ A CARGO: _____		CALDERAS: _____		HALLAZGO (H) _____		MANCA CON UNA (K) _____		SIMING		VERSION 02 FECHA: 25/06/2023																
ITEM	N° DESHOLLINADOR	V/V POPPET	TUBO ALIMENTADOR	LANZA	CAJA TRANSMISIÓN	REDUCTOR	MOTOR	BRAZO GUÍA	BRAZO ACCL	CÁMARA S.	EMP. PLENIA	VAPOR LIMPIEZA	ARE SELL	CREMALLERA	PRÓN	V/V CHECK	BANDEJA	POLINES	CADENA O TENSOR	V/V CORTE M.	OBSERVACIÓN	ACCIÓN COMPROMETIDA (REALIZAR AVISO)	FECHA					
																						LUN	MAR	MIÉ	JUE	VIE	SAB	DOM
1																												
2																												
3																												
4																												
5																												
6																												
7																												
8																												
9																												
10																												
11																												
12																												
13																												
14																												
15																												
16																												
17																												
18																												
19																												
20																												
21																												
22																												
23																												
24																												
25																												
TRABAJO REALIZADO:		SI	NO	CANTIDAD EQUIPOS EN TOTAL																	OBSERVACIÓN							
1.-	Ruta realizada a Deshollinadores																											
2.-	Limpieza y Vaciado de Bandejas																											
3.-	Limpieza Cajón de Polines																											
4.-	Limpieza Cámara de Sellos																											
5.-	Limpieza General Deshollinadores																											
6.-	Ajuste Prensa Estopa																											
7.-	Mantenimiento Taller Reductor (RG-CBC)																											
8.-	Mantenimiento Taller V/V Poppet																											
9.-	Mantenimiento Taller Cajón de Polines																											
10.-	Mantenimiento Taller Caja Transmisión																											
11.-	Mantenimiento PACKING																											
12.-	Mantenimiento (Otros Componentes)																											
13.-																												
14.-																												
15.-																												

Tabla 5.14 Formato de Registro ruta de inspección

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la tabla anterior, el formato se divide en secciones técnicas que facilitan su llenado en terreno:

Encabezado de Control: Identificación de responsables, fecha y ubicación física de los equipos.

Matriz de Componentes por Equipo: Desglose detallado de los elementos críticos para cada número de deshollinador.

Registro de Trabajos Realizados: Sección dedicada a la cuantificación de actividades de limpieza y mantenimiento en taller para el control de productividad y cumplimiento del plan.

Cronograma Semanal: Espacio para la validación visual del cumplimiento de la ruta durante los siete días de la semana.

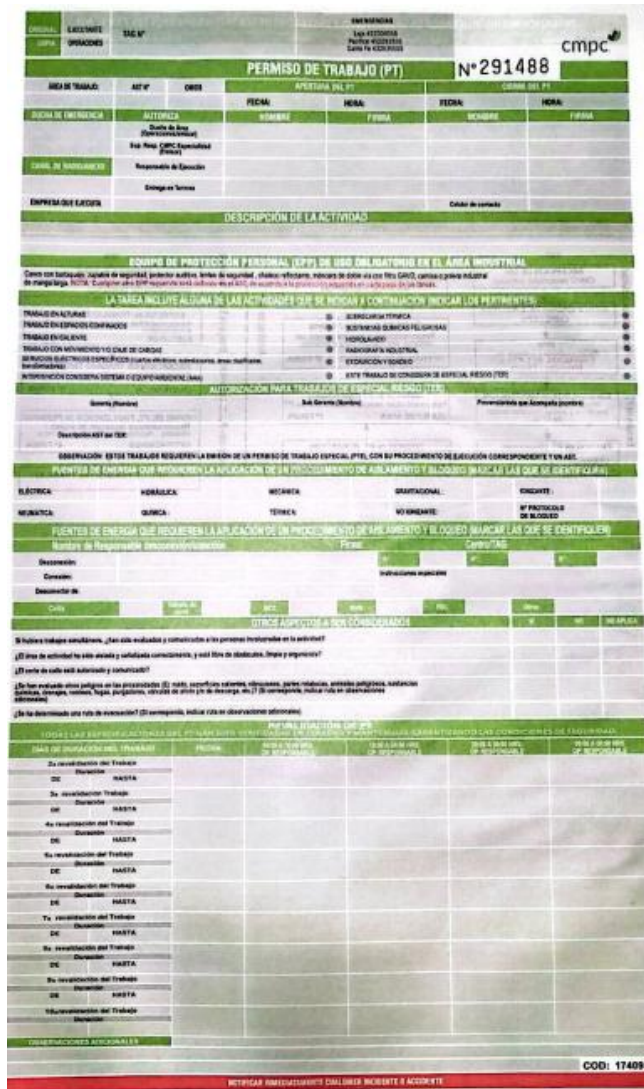
5.15 Elementos de Apoyo y seguridad:

La ejecución de las rutas de inspección y las actividades de mantenimiento predictivo en los deshollinadores Diamond Power IK-700 conlleva la exposición a riesgos críticos inherentes al entorno de calderas, tales como altas temperaturas, superficies calientes, presencia de partículas en suspensión (ceniza) y fluidos a alta presión (vapor). Por lo tanto, la seguridad no se considera una actividad aislada, sino un requisito habilitante y transversal a toda la estrategia de mantenimiento.

Antes de intervenir cualquier deshollinador IK-700 en las calderas, es obligatorio gestionar la documentación de control de riesgos. La correcta elaboración y validación de estos documentos constituye el primer filtro de seguridad antes de cualquier despliegue de herramientas o personal en terreno.

5.15.1 El Permiso de Trabajo (PT):

No es solo un trámite, sino una herramienta de verificación que asegura que las condiciones del entorno son aptas para la actividad. Este documento garantiza que el personal de operaciones ha entregado el equipo en condiciones seguras y que el equipo de mantenimiento comprende las limitaciones del área. En el formato que se presenta a continuación, se detallan las firmas de responsabilidad, la descripción de la tarea y la validación de las condiciones atmosféricas y de entorno necesarias para iniciar las labores."



PERMISO DE TRABAJO (PT) N°291488

ÁREA DE TRABAJO: ASISTENTE DE TRABAJO

DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD:

EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP) DE USO OBLIGATORIO EN EL ÁREA INDUSTRIAL:

FUENTES DE ENERGÍA QUE REQUIEREN LA APLICACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO DE AISLAMIENTO Y BLOQUEO (MÁS LAS QUE SE IDENTIFICAN):

OTROS ASPECTOS A CONSIDERAR:

VERIFICACIÓN DE CONDICIONES DE SEGURIDAD:

CONDICIÓN	VERIFICADO	FECHA	HORA	FIRMA	FECHA	HORA	FIRMA
Presencia de personal							
Estado de equipos							
...							

Figura 5.3 Permiso de Trabajo
Fuente: CMPC Santa Fe

5.15.3 Estándar de Ejecución de Mantenición:

Una vez obtenida la autorización administrativa, es imperativo asegurar que la intervención técnica se realice bajo parámetros de calidad y seguridad estandarizados. El Estándar de Ejecución de Mantenición funciona como una guía de buenas prácticas y procedimientos operacionales que el técnico debe seguir paso a paso.

El objetivo de este estándar es eliminar la improvisación en terreno, asegurando que componentes críticos como la alineación de la lanza, el torque de los pernos de la válvula Poppet y la lubricación de la cremallera se realicen según las especificaciones del fabricante Diamond Power. Este documento sirve además como una herramienta de control de calidad, permitiendo que el supervisor valide que el deshollinador quede en óptimas condiciones operativas antes de ser devuelto al servicio.

Nombre del equipo: Deshollinador		TAG:		N° SAP equipo:		
Trabajo a Ejecutar: INSPECCION DESHOLLINADORES		Código de Estándar:		Control Operacional Directo (COD):		
Recursos (M.O.) (marque con una "X")	Cant.	Herramientas y epp principales	Cant.	Repuestos y Materiales	Código SAP	Cant.
S. Mecánico	X 1	Linterna	1			
Electricista		Caja de herramientas	1			
Soldador						
Lubricador						
Hidráulico						
Mecánico 1°	X 1					
Ayud. Mecánico						
N°	Descripción Actividad	Ejecutor actividad	Cantidad	Tiempo (Min.)	Referencia Técnica	Punto de control
1	TRABAJOS PREVIOS					
1.1	Trasladar herramientas, materiales y repuestos de bodega	Supervisor EPS		15		
1.2	Gestionar Permiso de Trabajo	Supervisor EPS		15		
1.3	Charla 5 minutos	Supervisor EPS		10		
2	SECUENCIA DE INSPECCIÓN					
2.1	Revisar estado de estructura y guía eléctrica (cableado)	Mecánico		5		
2.2	Revisar líneas de aire	Mecánico		5		
2.3	Revisar caja de sello y flexibles	Mecánico		5		
2.4	Revisar reductor (carro)	Mecánico		5		
2.5	Revisar estado de bandejas	Mecánico		5		
2.6	Revisar limpieza en general	Mecánico		5		
2.7	Revisar cremalleras (lubricación soltura)	Mecánico		5		
2.8	Revisar polines guía (que gire libre)	Mecánico		5		
2.9	Revisar alineamiento de carros y polines	Mecánico		5		
2.10	Solicitar a operación poner en servicio como soplador	Mecánico		5		
2.11	Inspección de fugas y filtraciones de prensa, V/V poppet, carro soplador, caja sello y cubo de lanza	Mecánico		5		
2.12	Revisar estado de tubo alimentación	Mecánico		5		
2.13	Revisar estado de lanza (rotura, flexión)	Mecánico		5		
2.14	Tomar tiempo de trabajo de indexación del soplador	Mecánico		5		
2.15	Entrega de equipo	Mecánico		5		
3	TÉRMINO DEL TRABAJO					
3.1	Notificar Término de trabajo al supervisor CMPC a cargo del trabajo para comisionamiento estático	Supervisor EPS		15		
3.2	Limpieza y orden del lugar de trabajo (segregación de residuos)	Mecánico		10		
3.3	Cierre de FAF	Sup. Mecánico		5		
3.4	Generar informe técnico con detalle de mantención realizada	Sup. Mecánico		10		
			TOTAL	145		
Observaciones:						
V°B° Jefe de Área			Validación Jefe de Unidad			

Tabla 5.15 Estándar de ejecución de mantención
Fuente: Elaboración Propia

5.16 Plan de capacitación del personal:

La implementación de un plan de mantenimiento integral para los sopladores Diamond Power IK-700 requiere una transición desde el mantenimiento reactivo hacia una cultura de Confiabilidad Proactiva. Para ello, el personal técnico debe ser capacitado en tres pilares fundamentales:

1. Diagnóstico Predictivo: Vibraciones y Termografía:

El personal debe alcanzar la certificación en Análisis de Vibraciones Nivel I para transformar el oído del mecánico en un diagnóstico técnico basado en datos. Esto permite identificar frecuencias de falla en rodamientos del carro motor y desalineamientos en el eje de la lanza antes de que ocurra un atascamiento. Complementariamente, el uso de Termografía Infrarroja permite inspeccionar en caliente las Válvulas Poppet y las cajas de sello; detectar una fuga de vapor interna mediante el diferencial de temperatura no solo evita el desgaste erosivo de los componentes, sino que optimiza directamente la eficiencia térmica de la caldera.

2. Ecosistema Digital con Fractal:

La digitalización se centra en la adopción de Fractal como CMMS (Software de Gestión de Mantenimiento). La capacitación debe enfocarse en la movilidad: el uso de tablets en terreno para la apertura y cierre de Órdenes de Trabajo (OT) mediante códigos QR, la carga de evidencia fotográfica y la consulta de manuales técnicos en tiempo real. Este flujo de información elimina la burocracia del papel y garantiza que la hoja de vida de cada uno de los 43 sopladores esté actualizada con datos precisos para auditorías y análisis de fallas.

3. Gestión por Indicadores (KPIs)

Finalmente, el equipo debe comprender la interpretación de los indicadores de clase mundial. El objetivo es que el mantenedor entienda cómo su precisión técnica impacta en el MTBF (Tiempo Medio entre Fallas), extendiendo la vida útil del equipo, y cómo una buena planificación y el uso de herramientas adecuadas reducen el MTTR (Tiempo Medio de Reparación). Esta comprensión permite que el personal no solo ejecute tareas, sino que proponga mejoras basadas en la Disponibilidad real de los equipos, asegurando que el soplado de hollín sea constante y eficiente para la operación de la planta.

5.16.1 Digitalización del Mantenimiento: Software Fracttal:

Fracttal se define como un GMAO (Gestión del Mantenimiento Asistida por computador). de nueva generación diseñado para digitalizar el mantenimiento, conectando los activos con las personas mediante tecnología en la nube e Inteligencia Artificial. Reemplaza el uso de planillas manuales y Excel por una base de datos única y digital. Permite tener la hoja de vida, planos y manuales de cada soplador accesibles al instante mediante códigos QR.

- Gestión de Órdenes de Trabajo (OT): Automatiza la asignación y seguimiento de tareas. Los técnicos pueden abrir, ejecutar y cerrar OTs desde sus dispositivos móviles en terreno, adjuntando fotografías y firmas digitales como evidencia. Los técnicos reciben notificaciones de tareas pendientes directamente en sus smartphones, optimizando los tiempos de respuesta.
- Control de Inventarios y Bodega: Gestiona de forma automática el stock de repuestos y materiales necesarios para las intervenciones, evitando retrasos por falta de suministros críticos.
- Análisis de Datos y KPIs: Genera automáticamente indicadores de clase mundial como MTBF (Confiabilidad), MTTR (Mantenibilidad) y disponibilidad de los equipos, facilitando la toma de decisiones estratégicas basadas en datos reales.

La implementación de un GMAO permite a las organizaciones llevar a cabo las siguientes tareas:

- Planificar mantenimientos preventivos y predictivos.
- Crear y asignar Órdenes de Trabajo de forma automática.
- Gestionar repuestos, almacenes y consumos asociados.
- Registrar intervenciones y disponer de una trazabilidad clara de los procesos
- Monitorizar KPIs básicos como MTTR, MTTF y MTBF.
- Visualizar en tiempo real el estado de los activos.

5.16.2 Indicadores más comunes en un GMAO

- MTTR (Tiempo Medio de Reparación): este indicador evalúa el tiempo promedio que se requiere para reparar un equipo desde que se produce un fallo hasta que vuelve a estar en funcionamiento. Esto ayuda a medir la efectividad de la respuesta al problema.
- MTTF (Tiempo Medio hasta la Falla): esta métrica representa el tiempo promedio durante el cual un activo funciona correctamente antes de experimentar una fallo, siendo una medida útil para evaluar la confiabilidad de los equipos.
- MTBF (Tiempo medio entre fallos): este KPI indica el lapso promedio entre una avería y la siguiente. Cuanto mayor sea este valor mayor será la disponibilidad operativa de un activo.

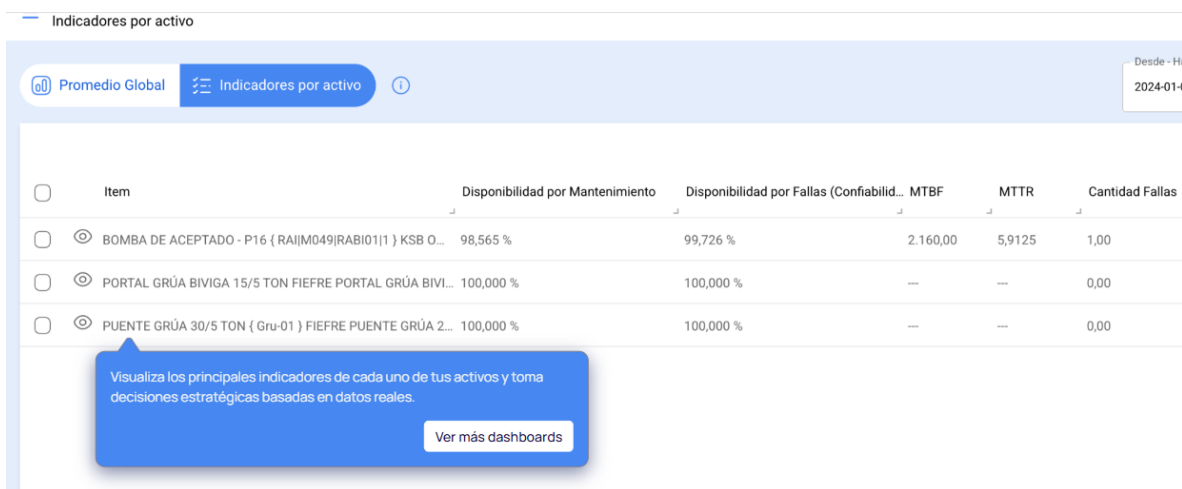


Figura 5.5 Monitorización de indicadores claves con Fracttal

Fuente: Fracttal

En conjunto, un GMAO moderno no solo ayuda a controlar lo que ocurre, sino que permite anticiparse a los fallos, tomar decisiones con datos en tiempo real. En definitiva, asegurar operaciones de mantenimiento más seguras, eficientes y con costes mucho más bajos.

5.16.3 Estrategia de implementación de Software Fracttal:

Para asegurar el éxito operativo de la plataforma Fracttal en el área de calderas, se establece un procedimiento de implementación estructurado en las siguientes fases consecutivas:

- **Codificación y Vinculación por Códigos QR:** Cada uno de los sopladores de la flota será ingresado al sistema como un activo independiente, generando un código QR único que se instalará en terreno mediante placas de alta resistencia térmica en la estructura del equipo. El escaneo de este código en terreno desplegará inmediatamente en el dispositivo móvil del técnico la hoja de vida del soplador, el plano de despiece, el histórico de contramarchas y el stock disponible de sus repuestos críticos (como empaquetaduras de prensa y componentes de la válvula Poppet).
- **Carga de Planes de Matriz Preventiva y Predictiva:** Se migrarán las cartillas de lubricación (frecuencias de inspección diaria y semanal para productos Mobil y Chesterton) y los nuevos protocolos de monitoreo de condición (rutas de vibroanálisis y termografía) al planificador automático del software. Esto transformará la asignación manual en OTs preventivas automatizadas basadas en tiempo calendario u horas de operación de la caldera.
- **Flujo Operativo de Órdenes de Trabajo en Movilidad:** Ante una alerta generada por mantenimiento predictivo o una anomalía detectada en la ruta diaria, el sistema emitirá una OT digital. El técnico asignado recibirá una notificación en su smartphone, ejecutará la tarea guiada por el protocolo estandarizado adjunto en la app, y cerrará la orden cargando de forma obligatoria los tiempos reales de intervención, los repuestos utilizados de bodega y el registro fotográfico del trabajo concluido.

Finalmente, la implementación del software Fracttal cambia el enfoque del departamento de mantenimiento desde una cultura reactiva a una estrategia proactiva basada en datos. La disponibilidad de tableros de control en tiempo real permite al departamento de confiabilidad evaluar la eficiencia de la mano de obra, el cumplimiento de los planes preventivos y el costo real por soplador. Esta visibilidad estadística es el soporte fundamental para la mejora continua del plan propuesto, garantizando que las decisiones de inversión en mantenimiento predictivo cuenten con un respaldo financiero y técnico verificable dentro de la organización.

CAPÍTULO 6: EVALUACIÓN ECONÓMICA

6.1 Evaluación Económica y factibilidad del proyecto:

La implementación de un plan de mantenimiento integral no debe considerarse únicamente como un requerimiento técnico, sino como una inversión estratégica orientada a la maximización de la rentabilidad y la continuidad operativa de la planta. El presente capítulo tiene como objetivo cuantificar el impacto financiero derivado de la transición desde un modelo de mantenimiento mayoritariamente reactivo hacia una gestión digitalizada y basada en la condición para la flota de 43 sopladores IK-700.

Para determinar la viabilidad del proyecto, se analizarán los costos asociados a la adquisición de tecnologías predictivas tales como vibroanálisis y termografía, y la implementación de la plataforma GMAO Fracttal. Asimismo, se cuantificarán los ahorros proyectados en áreas críticas como la reducción de horas extras, la disminución de fallas catastróficas.

6.2 Inversión Sistema de Vibroanálisis:

Se propone la implementación de un sistema de análisis de vibraciones basado en el software Fluke 810.

Este equipo ha sido seleccionado por su capacidad de realizar diagnósticos avanzados con alta resolución, lo que permite identificar fallas específicas en los componentes críticos del soplador que operan bajo condiciones de estrés térmico y mecánico extremo.

Costo Estimado de Implementación:

- Fluke 810 Vibration Tester (equipo base): \$11.621.000 CLP.
- Sensor Triaxial 810S de Alta Temperatura: \$1.872.000 CLP (Acelerómetro triaxial certificado para ambientes con gases corrosivos y altas temperaturas).
- Accesorios para Alta Temperatura: \$1.007.000 CLP (Incluye cables de extensión con aislamiento de Teflón y bases magnéticas resistentes a temperatura).
- Tablet Ruggerizada (Controlador de campo): \$1.200.000 CLP.

Inversión Total Estimada: \$15.700.000 CLP.

6.3 Inversión de Cámara Termográfica:

Para complementar el análisis vibracional, se propone la integración de una cámara termográfica FLIR E8 Pro. Esta tecnología permite la detección de gradientes de temperatura anómalos sin contacto físico, lo cual es vital en la zona de sopladores donde el calor radiante impide mediciones manuales seguras.

Costo Estimado de Implementación:

- Cámara FLIR E8 Pro (Res. 320x240): \$4.200.000 a \$4.800.000 CLP.
- Certificación ITC Nivel 1 (Capacitación): \$1.900.000 CLP.
- Software de Reportabilidad (FLIR Thermal Studio): Incluido.

Inversión Total Estimada: \$4.841.000 CLP.

6.4 Gestión de Activos mediante: GMAO

Se propone la implementación de Fractal, un software de gestión de mantenimiento basado en la nube, para centralizar la información técnica, administrativa y operativa de la flota de sopladores. El objetivo es pasar de un modelo reactivo a uno Predictivo-Proactivo, integrando las alarmas de condición directamente en las Órdenes de Trabajo OT.

Costo Estimado de Implementación:

- Suscripción Anual (Plan Business - 5 usuarios): \$3.200.000 a \$4.000.000 CLP.
- Onboarding Profesional (Configuración inicial): \$2.500.000 CLP (Pago único para cargar los 43 sopladores y planes maestros).
- Capacitación de Personal: \$1.000.000 CLP.

Inversión Total Año 1: \$7.500.000 CLP

Licencias para Usuarios Adicionales: En caso de requerir la incorporación de nuevos perfiles de supervisión, planificación o inspección técnica que excedan la base inicial de 5 usuarios, la plataforma contempla un costo marginal por licencia adicional estimado entre \$55.000 y \$75.000 CLP mensuales (\$660.000 a \$900.000 CLP anuales por usuario).

6.5 CAPEX

La transición estratégica desde un modelo de mantenimiento mayoritariamente reactivo hacia un ecosistema de gestión basado en la condición requiere el despliegue de capital destinado a la adquisición de activos fijos, tecnologías e instrumentación especializada. Este esfuerzo financiero se agrupa bajo el concepto de CAPEX, Este representa la inversión estratégica en activos físicos y tecnológicos que la organización adquiere para mejorar su capacidad operativa y extender la vida útil de sus equipos críticos

A continuación, se exhibe la matriz consolidada de los requerimientos de inversión inicial para la puesta en marcha del plan propuesto:

Ítem	Detalle	Valor (CLP)
Vibroanálisis	Fluke 810 + Sensor Triaxial Alta T°	\$15.700.000
Termografía	FLIR E8 Pro	\$4.841.000
Software GMAO	Fractal	\$7.500.000
Capacitación	ISO Cat I y Termografía Nivel 1	\$4.000.000
TOTAL, CAPEX	Inversión Inicial	\$32.041.000

Tabla 6.5 CAPEX
Fuente: Elaboración Propia

Desde la perspectiva de la gestión de activos, el CAPEX consolidado de \$32.041.000 CLP, no debe ser interpretado como un gasto tecnológico aislado, sino como la base habilitante para la transformación cultural del departamento de mantenimiento. La asignación de estos recursos financieros permite mitigar la incertidumbre operativa en el área de calderas, migrando de un esquema reactivo altamente expuesto a detenciones forzadas por fallas en motores, reductores y el resto de los componentes del deshollinador, hacia una estrategia proactiva basada en la certidumbre de los datos.

La integración de instrumentación predictiva, soportada por un sistema de gestión GMAO y personal técnicamente calificado bajo estándares internacionales, asegura una ventana táctica de planificación óptima. En consecuencia, esta inversión inicial se traduce directamente en un incremento del Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y en un control riguroso sobre los costos de ciclo de vida del activo, blindando la continuidad operacional de la planta y justificando plenamente el retorno del capital invertido.

6.6 Ahorro Anual:

A continuación, se presenta la evaluación del potencial de ahorro anual para la flota de sopladores de hollín Diamond Power IK-700. Este análisis contrasta analíticamente los costos económicos asociados a la reparación de fallas de carácter catastrófico frente a los costos de intervenciones menores programadas oportunamente gracias al diagnóstico predictivo.

Ítem de Falla por Componentes	Frecuencia Histórica	Costo Correctivo (Repuestos)	Costo Predictivo (Repuestos)	Ahorro Unitario Neto	Ahorro Bruto Potencial (100%)	Año 1 (Efectividad 70%)	Año 2 (Efectividad 80%)	Años 3 y 4 (Efectividad 85%)
A. Transmisión y Potencia	12 eventos	\$1.150.000	\$200.000	\$950.000	\$11.400.000	\$7.980.000	\$9.120.000	\$9.690.000
B. Inyección de Vapor	10 eventos	\$480.000	\$100.000	\$380.000	\$3.800.000	\$2.660.000	\$3.040.000	\$3.230.000
C. Traslación y Soporte	18 eventos	\$580.000	\$120.000	\$460.000	\$8.280.000	\$5.796.000	\$6.624.000	\$7.038.000
AHORRO ANUAL EN REPUESTOS	40 eventos	—	—	—	\$23.480.000	\$16.436.000	\$18.784.000	\$19.958.000

Tabla 6.6 Ahorro Anual
Fuente Elaboración Propia

- **Sistema de Transmisión y Potencia:** El costo correctivo modela una falla mayor en cadena donde la degradación de rodamientos destruye engranajes y tuerce el eje del carro reductor. El enfoque predictivo, mediante análisis de vibraciones, detecta la anomalía en etapa temprana, permitiendo el recambio exclusivo de rodamientos de precisión SKF y salvando los componentes mayores.
- **Sistema de Inyección de Vapor:** El gasto correctivo responde a fugas continuas en la válvula Poppet que erosionan su asiento por cavitación y dañan el tubo alimentador por choque térmico. El escenario predictivo emplea termografía infrarroja para identificar la firma térmica de la fuga en reposo, programando un asentamiento menor y el cambio de empaquetaduras.
- **Sistema de Traslación y Soporte:** En el régimen correctivo, la desalineación de los rodillos guía acelera el desgaste de la cremallera y provoca el atascamiento del carro, doblando la lanza por flexión térmica dentro de la caldera. El mantenimiento predictivo interviene el soplador ante soldaduras mecánicas basándose en inspecciones dirigidas, sustituyendo rodillos y nivelando la viga carril de forma oportuna.

6.6.1 Análisis del ciclo de maduración y eficiencia del plan Predictivo:

El modelo financiero no asume una eficiencia estática del 100%, sino una curva de aprendizaje y maduración técnica dividida en tres factores de efectividad:

- **Año 1 - Fase de Estabilización (70% de Efectividad):** Parámetro conservador que contempla un 30% de fallas no interceptadas. Responde a la marcha blanca del proyecto: carga inicial de datos en el GMAO Fracttal, calibración de líneas base de vibración y familiarización del personal con los equipos.
- **Año 2 - Fase de Consolidación (80% de Efectividad):** Incremento fundamentado en la acumulación de tendencias históricas en el software. Permite aplicar el análisis de dispersión Jack-Knife para optimizar las rutas de inspección y controlar de forma analítica a los sopladores crónicos.
- **Año 3 - Régimen Estable (85% de Efectividad):** Tope técnico realista para el entorno hostil de una caldera recuperadora. El 15% de resguardo permanente asume la coexistencia de fallas residuales fortuitas causadas por el ataque químico, altas temperaturas y la ceniza abrasiva, consolidando un régimen predictivo maduro y seguro.

6.7 Optimización de Horas extra:

Bajo el esquema de mantenimiento correctivo actual, las detenciones imprevistas obligan a la ejecución de intervenciones de emergencia durante turnos nocturnos o jornadas de fin de semana. Estos contextos críticos incrementan el riesgo de incidentes por fatiga del personal técnico y elevan los tiempos muertos logísticos debido a la baja disponibilidad inmediata de herramientas especiales o repuestos específicos en las bodegas periféricas, Esto obliga a pagar HE (Horas Extra).

Cada vez que los 4 trabajadores van a la planta por 5 horas de emergencia:

- **HE totales por llamado:** 5 horas x 4 trabajadores = 20 HE totales.
- **Costo en dinero:** 20 HE x \$6.600 = \$132.000 por evento.

El análisis de intervenciones de emergencia para la flota de 43 sopladores indica un costo por evento de **\$132.000 CLP**, considerando una cuadrilla de 4 especialistas en jornada extraordinaria. Bajo un régimen de 2 llamados mensuales, el gasto anual asciende a **\$3.168.000 CLP**.

La implementación del plan predictivo permite programar estas 480 horas hombres anuales dentro de la jornada ordinaria, capturando un ahorro directo en sobretiempo y optimizando la disponibilidad del personal técnico, coordinando de manera anticipada el bloqueo seguro del soplador con el área de operaciones de la caldera. De este modo, se maximiza la tasa de utilización de la cuadrilla técnica, se optimizan los estándares de seguridad bajo procedimientos controlados y se elimina el pago de recargos salariales por sobretiempo.

6.8 Evaluación de Rentabilidad VAN y TIR:

Con el propósito de determinar la viabilidad y factibilidad financiera de la propuesta de mantenimiento integral para la flota de sopladores Diamond Power IK-700, se estructura un modelo de Flujo de Caja proyectado a un horizonte de evaluación de 3 años. Este plazo se alinea con el ciclo de renovación tecnológica de los activos digitales y el software implementado.

Al consolidar los egresos e ingresos proyectados, se obtiene la estructura financiera detallada

Concepto Económico	Año 0	Año 1 (70%)	Año 2 (80%)	Año 3 (85%)
Ahorro Neto en Repuestos	—	\$16.436.000	\$18.784.000	\$19.958.000
Ahorro en Horas Extraordinarias	—	\$950.400	\$1.267.200	\$1.584.000
Ingresos Operacionales Totales	—	\$17.386.400	\$20.051.200	\$21.542.000
Suscripción Anual Fractal (OPEX)	—	\$-3.600.000	\$-3.600.000	\$-3.600.000
Inversión Inicial (CAPEX)	\$-32.041.000	—	—	—
FLUJO DE CAJA NETO	\$-32.041.000	\$13.786.400	\$16.451.200	\$17.942.000

Tabla 6.7 Flujo de caja
Fuente: Elaboración Propia

Para validar la factibilidad económica de la propuesta, se seleccionaron tres indicadores financieros clave utilizados internacionalmente en la evaluación de proyectos de ingeniería: el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación del Capital (Payback). A continuación, se detalla la justificación técnica y el desarrollo matemático de cada uno de ellos:

A. Valor Actual Neto (VAN):

El VAN es un indicador dinámico que mide la riqueza neta adicional que genera el proyecto, expresada en dinero del presente. Dado que el poder adquisitivo del dinero varía en el tiempo debido a tasas de interés y costos de oportunidad, los flujos de caja futuros de los Años 1, 2 y 3 no se pueden sumar directamente de forma aritmética; deben ser actualizados (descontados) al Año 0 utilizando la tasa de corte establecida (12%).

El modelo matemático responde a la siguiente ecuación general:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t}$$

Donde I_0 representa la inversión inicial (CAPEX), F_t el flujo de caja neto del período t , y n el horizonte de evaluación de 3 años.

$$VAN = -32.041.000 + \frac{13.786.400}{(1+0,12)^1} + \frac{16.451.200}{(1+0,12)^2} + \frac{17.942.000}{(1+0,12)^3}$$

$$VAN = -32.041.000 + 12.309.286 + 13.114.796 + 12.770.761$$

$$VAN = \$6.153.843 \text{ CLP}$$

El criterio de decisión estipula que si el $VAN > 0$, el proyecto es financieramente rentable. En este caso, el excedente de \$6.153.843 CLP confirma que el proyecto cubre la inversión y los costos operativos de la licencia del software, generando valor económico puro para la empresa.

B. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR evalúa la eficiencia o el rendimiento porcentual interno del capital invertido. Técnicamente, se define como la tasa de descuento específica (r) que equilibra matemáticamente los flujos de caja futuros con la inversión inicial, provocando que el VAN sea exactamente igual a cero:

$$-I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} = 0 \rightarrow r = \text{TIR}$$

El cálculo de este indicador se realiza aplicando los flujos netos reales en la siguiente ecuación de equilibrio:

$$-32.041.000 + \frac{13.786.400}{(1+r)^1} + \frac{16.451.200}{(1+r)^2} + \frac{17.942.000}{(1+r)^3} = 0$$

$$TIR = 22,38\%$$

El criterio de aprobación determina que un proyecto es viable cuando su $TIR > k$ (tasa de descuento). Debido a que la TIR del 22,38% supera la valla del 12% exigido por el sector industrial, se demuestra la rentabilidad intrínseca de la propuesta de mantenimiento predictivo.

C. Período de Recuperación del Capital (Payback)

El Payback determina el horizonte temporal necesario para que la organización recupere el capital desembolsado originalmente ($I_0 = \$32.041.000$ CLP). A diferencia del método estático, este análisis computa el retorno analizando la acumulación sucesiva de los flujos de caja netos anuales:

- Al finalizar el **Año 1**, el proyecto retorna \$13.786.400 CLP. El saldo remanente por recuperar se calcula como:

$$\$32.041.000 - \$13.786.400 = \$18.254.600$$

- Durante el **Año 2**, el proyecto genera un flujo neto de \$16.451.200 CLP.

$$\$18.254.600 - \$16.451.200 = \$1.803.400$$

- Durante **Año 3**: El flujo neto es de \$17.942.000. Como este flujo supera el saldo pendiente de \$1.803.400, la recuperación total se concreta durante este período. Para conocer cuántos meses del Año 3 se necesitan para cubrir el saldo faltante de \$1.803.400, se calcula directamente:

$$\text{Meses del Año 3} = \frac{\$1.803.400}{\$17.942.000} \times 12 \text{ meses} = 1,2 \text{ meses}$$

Sumando los dos primeros períodos completos y la fracción del tercero, el tiempo de retorno exacto se establece en **2,1 años (aproximadamente 2 años y 1 mes)**. Este rápido período de recuperación minimiza la exposición al riesgo financiero y asegura la sustentabilidad del proyecto a corto plazo.

La evaluación económica demuestra de manera concluyente la factibilidad de la propuesta, consolidando un **VAN de \$6.153.843 CLP** y una **TIR del 22,4%** que casi duplica la tasa de descuento exigida del 12%. Bajo un enfoque operativo conservador, los ahorros escalonados en repuestos críticos y la reducción del 50% en horas extraordinarias mitigan con holgura la inversión inicial de **\$32.041.000 CLP (CAPEX)** y los costos fijos anuales de la licencia Fractal (OPEX), garantizando el retorno total del capital en un período de **2,1 años (Payback)**. Estos indicadores califican al proyecto como una inversión de alta certidumbre, rentabilidad y bajo riesgo financiero, asegurando la sustentabilidad de la gestión de activos para la Caldera Recuperadora N°1.

Conclusión:

El presente trabajo de titulación tuvo como propósito fundamental el diseño e implementación de un Plan de Mantenimiento Integral para los sopladores de hollín Diamond Power IK-700 de la caldera recuperadora CR1 de CMPC Santa Fe, respondiendo a una problemática concreta de gestión de activos críticos en un ambiente industrial de alta exigencia operacional.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que los objetivos planteados fueron alcanzados satisfactoriamente. La aplicación sistemática de herramientas de ingeniería de confiabilidad, tales como la Matriz de Criticidad, el análisis de causa raíz mediante diagrama de Ishikawa y el Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF), permitió caracterizar con precisión el comportamiento de falla de los componentes del sistema, estableciendo una base técnica sólida para la priorización de intervenciones. A partir de este diagnóstico, se estructuró un plan que integra mantenimiento preventivo estandarizado, tecnologías predictivas de vibroanálisis y termografía infrarroja, protocolos de seguridad operacional y gestión digital mediante el software GMAO Fractal, configurando un sistema de mantenimiento de clase mundial adaptado a las condiciones específicas del activo intervenido.

Desde la perspectiva económica, la evaluación financiera confirma la rentabilidad del proyecto, con un Valor Actual Neto de \$6.153.843 CLP, una Tasa Interna de Retorno del 22,4% esto es superior a la tasa de descuento exigida del 12% y un período de recuperación de la inversión de 2,1 años sobre un CAPEX de \$32.041.000 CLP, indicadores que validan la solidez financiera de la propuesta.

En síntesis, la presente tesis demuestra que abordar el mantenimiento industrial desde una perspectiva integral, sustentada en datos, metodología y tecnología, no solo reduce el riesgo operacional y los costos asociados a fallas no planificadas, sino que además genera valor económico medible y sostenible para la organización. El plan desarrollado sienta las bases para que la empresa avance hacia una cultura de confiabilidad que trascienda el activo intervenido y se extienda progresivamente al conjunto de sus sistemas críticos.

Recomendaciones:

Como resultado del desarrollo e implementación del presente Plan de Mantenimiento Integral, se formulan las siguientes recomendaciones orientadas a consolidar y dar continuidad a los resultados obtenidos:

1. Revisión anual del plan: Actualizar frecuencias de inspección y procedimientos al término de cada año, incorporando los datos de falla registrados en Fracttal y ajustando el plan según la evolución real de los activos.
2. Extensión de la metodología a otros equipos críticos: Replicar el análisis AMEF y la Matriz de Criticidad en los ventiladores VTI, VTF, el precipitador electrostático ESP y las bombas de licor negro, ampliando el alcance del mantenimiento predictivo a toda la caldera recuperadora.
3. Capacitación continua del personal: Establecer un programa de formación anual que permita avanzar hacia certificaciones de mayor nivel en vibroanálisis (ISO 18436-2 Categoría II) y termografía (Nivel II ITC), fortaleciendo las competencias internas del equipo.
4. Instalación de puntos de medición permanentes: Evaluar la incorporación de bases de medición fijas en los puntos críticos definidos en el protocolo de vibroanálisis, asegurando repetibilidad y comparabilidad entre mediciones en zonas de difícil acceso.
5. Auditoría semestral del plan: Realizar una auditoría interna cada seis meses para verificar el cumplimiento de las rutas de inspección, el correcto uso del sistema Fracttal y el comportamiento de los KPI definidos (MTBF, MTTR y NPR).

Bibliografía y fuentes de información:

- Babcock & Wilcox. (s.f.). Recovery boilers – Steam generation.
<https://www.babcock.com/products/recovery-boilers>
- Clyde Industries. (s.f.). High power low pressure sootblowing. <https://clyde-industries.com/products-and-solutions/high-power-low-pressure-sootblowing?lang=es>
- CMPC. (2020). Reporte Integrado 2020.
https://www.cmpc.com/assets/uploads/2023/06/REPORTE_INTEGRADO_2020_ESP.pdf
- Coordinador Eléctrico Nacional. (2018). Determinación de parámetros de partida y detención Central CMPC Santa Fe (Informe BF_178-2018).
https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2019/08/BF_178-2018_Determinacion_de_Parametros_de_Partida_y_Detencion_Central_CMPC_Santa_Fe_anexo1.pdf
- FLIR Systems. (s.f.). FLIR E8 Pro infrared camera. <https://www.flir.com>
- Fluke Corporation. (2023). Fluke 810 Vibration Tester – User manual.
<https://www.fluke.com/es-cl/producto/pruebas-de-mantenimiento/analizadores-de-vibraciones/fluke-810>
- Fractal. (s.f.). ¿Qué es un GMAO? <https://www.fractal.com/es/guias-mantenimiento/que-es-un-gmao>
- HMA Group. (s.f.). B&W Diamond Power sootblower poppet valves.
<https://hmagrp.com/bw-diamond-power-sootblower-poppet-valves>
- ICEP. (s.f.). About Chile – Eucalyptus plantations.
https://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/5th_ICEP_About+Chile.pdf
- Ishikawa, K. (1986). ¿Qué es el control total de calidad? La modalidad japonesa. Norma.
- Soot-Blower.com. (s.f.). Feed tube packing – Soot blower spare parts. <https://www.soot-blower.com/soot-blower-spare-parts/soot-blower-auxiliary-parts/feed-tube-packing.html>