

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

**PROPUESTA DE MEJORA EN EL DISEÑO DE ROMPEDORES DE
CORTEZA PARA TORNILLO SIN FIN EN EL SILO DE ALIMENTACIÓN EN
CALDERA DE PODER CELULOSA ARAUCO LÍNEA 3**

Trabajo De Titulación para optar al
Título Profesional de:

**INGENIERO EN
MANTENIMIENTO INDUSTRIAL
CON LICENCIATURA EN
INGENIERÍA.**

Nombre del alumno:

Edson Eduardo Fernandez Oliva.

Profesor guía:

Víctor Hugo Valdebenito Cartes.

DEDICATORIA

Hoy quiero detenerme un momento para expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte de este largo camino, desde el inicio hasta la culminación de esta hermosa etapa tan significativa en mi vida.

En primer lugar, a mi familia, quienes siempre han sido mi refugio y mi mayor fuente de fuerza. A mis hijos, quienes con su amor y alegría me recordaron que, a pesar de mis años, los sueños académicos se pueden lograr con esfuerzo y sacrificio. Ustedes son mi mayor inspiración y el motivo por el cual nunca me he rendido. Este logro también es de ustedes, porque me enseñaron que siempre se puede seguir adelante.

A mis padres, hermanos y amigos que compartieron conmigo conversaciones que me recordaron que no estaba solo en este trayecto. Su compañía hizo que en los momentos más difíciles lo fueran menos pesados y que cada logro tuviera un sabor aún más dulce.

También quiero reconocer a esas personas que, con una palabra amable, un gesto de apoyo o una muestra de confianza y cariño, dejaron una marca imborrable en mi corazón.

Finalmente, mi más sincero agradecimiento a mis profesores, quienes no solo compartieron su conocimiento, sino también su pasión por enseñar. Su guía y dedicación han sido fundamentales en mi desarrollo personal y profesional. Mucho de lo que soy hoy se lo debo a ustedes, a su paciencia y a su compromiso con mi formación.

A cada uno de ustedes, gracias desde lo más profundo de mi ser. Sus huellas han quedado grabadas en mi camino, y cada paso que doy hacia el futuro lleva consigo un pedacito de todo lo que me han dado.

Con eterno agradecimiento y cariño.

RESUMEN

El presente trabajo de título se desarrolla en la Planta Celulosa Arauco Línea 3, específicamente en su caldera de poder, un componente esencial para la generación de energía que permite el funcionamiento continuo y eficiente de las operaciones de la planta. Celulosa Arauco, una de las empresas forestales más importantes de Chile, se dedica a la producción de celulosa, madera aserrada, tableros y productos remanufacturados, destacándose por su compromiso con la sostenibilidad y la innovación tecnológica. Este estudio aborda una problemática específica en el sistema de alimentación de biomasa.

En la primera parte del informe, se presentan el objetivo principal del proyecto y los objetivos específicos que su estructura permite, un enfoque claro y metodológico. Estos objetivos están orientados a identificar y resolver las principales falencias operativas y de diseño en el sistema de alimentación de biomasa, centrándose en los tornillos sin fin y los rompedores de biomasa.

El informe describe el proceso productivo de la caldera de poder, que utiliza biomasa de Eucalyptus (tipo globulus) como combustible principal. Este recurso, aunque sostenible y disponible en abundancia, presenta desafíos técnicos significativos debido a su calidad variable y la presencia de lodo que es combinado junto con la biomasa en el proceso de alimentación de la caldera de poder. El sistema de alimentación de biomasa, compuesto por los tornillos sin fin de acero inoxidable con revestimiento de soldadura dura, motores, reductores, cintas transportadoras y dos silos de almacenamiento, ha mostrado una gran falla recurrente relacionada con el desgaste acelerado de sus componentes y la insuficiencia de los rompedores de biomasa que tienen los tornillos sin fin. Estas fallas generan detenciones no programadas.

En el capítulo teórico, se analiza la evolución del mantenimiento industrial, destacando la transición hacia estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo en sistemas críticos como el de la caldera de poder. Este enfoque teórico incluye una revisión exhaustiva de los materiales utilizados en los tornillos sin fin, como el acero inoxidable y los revestimientos de soldadura dura, proponiendo el uso de materiales más resistentes al desgaste, como lo es el acero Hardox 450, para extender la vida útil de los componentes y reducir así los costos.

El diagnóstico y las falencias del sistema se realizó mediante un análisis de datos históricos de cuatro meses permitieron identificar las principales causas de las fallas. El desgaste acelerado de los tornillos sin fin, la falta de eficacia de los rompedores de biomasa y las detenciones frecuentes del sistema representan las problemáticas más críticas. Estas fallas no solo interrumpen el flujo continuo de alimentación con biomasa hacia la caldera de poder, sino que también implican elevados costos asociados al mantenimiento correctivo, pérdida de productividad y reducción de la vida útil de estos equipos.

La propuesta se enfoca en mejorar y optimizar los rompedores de biomasa, utilizando el acero Hardox 450 como un material de alta resistencia al desgaste y aplicando un diseño mejorado que permita un flujo más eficiente de biomasa hacia la caldera de poder. Estas mejoras están respaldadas por análisis técnicos y económicos que demuestran su viabilidad. Los resultados proyectados incluyen una reducción significativa en los costos operativos.

En conclusión, este trabajo representa una contribución significativa para la operación de Celulosa Arauco Línea 3, al abordar una problemática específica con una solución técnica y económicamente viable. Los resultados esperados no solo optimizan la operación de la caldera de poder, sino que también establecen un modelo replicable para enfrentar desafíos similares en otras áreas de la industria. Este proyecto destaca la importancia de combinar innovación, análisis técnico y sostenibilidad para impulsar mejoras en los procesos industriales.

ÍNDICE TEMÁTICO

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
ALCANCE Y LIMITACIONES.....	4
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. GENERACIONES DEL MANTENIMIENTO	6
1.1.1. Mantenimiento	6
1.1.2. Finalidad	6
1.1.3. Objetivos del mantenimiento	6
1.1.4. Mantenimiento predictivo.....	7
1.1.5. Mantenimiento preventivo.....	7
1.1.6. Mantenimiento correctivo.....	8
1.2. INDICADORES DEL MANTENIMIENTO.....	8
1.2.1. Tiempo medio entre fallas (Mean time between failures)	8
1.2.2. Tiempo medio para reparar (Mean time to repair).....	9
1.2.3. Disponibilidad.....	10
1.2.4. Confiabilidad	11
1.3. TIPOS DE DIAGRAMAS.....	11
1.3.1. Diagrama de Ishikawa	11
1.3.2. Diagrama de Pareto.....	12
1.3.3. Los cinco ¿Por qué?.....	13
1.4. PROCESOS DE SOLDADURA APLICADA EN HARDOX 450	14

1.4.1	Tipos de soldaduras aplicadas.....	14
1.4.2.	Propiedades mecánicas del acero Hardox y composición química	16
1.5.	PRINCIPALES FUERZAS APLICADAS EN LOS EQUIPOS ROTATORIOS.....	18
1.5.1.	Fuerza de corte.....	18
1.5.2.	Fuerza de tracción.....	19
1.5.3.	Fuerza axial.....	19
1.5.4.	Fuerza de fricción	19
	CAPÍTULO 2: SITUACIÓN ACTUAL	20
2.1.	DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	21
2.2.	EMPRESA CELULOSA PLANTA ARAUCO LÍNEA 3	22
2.2.1.	Ubicación y capacidad de la planta línea 3.....	23
2.2.2.	Compromiso con la sostenibilidad.....	24
2.2.3.	Estrategia de sustentabilidad.....	24
2.2.4.	Estrategia de sostenibilidad	25
2.2.5.	Capacidad de producción.....	26
2.3.	PROCESO PRODUCTIVO DE LA EMPRESA.....	27
2.3.1.	Calidad de la biomasa	29
2.3.2.	Mezcla con lodo.....	29
2.3.3.	Impacto ambiental y normativas.....	30
2.4.	DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS QUE ALIMENTAN LA CALDERA DE PODER.....	30
2.4.1.	Fabricante de los equipos.....	30
2.4.2.	Principales productos	31
2.4.3.	Diseño actual de tornillo de alimentación y rompedores de biomasa..	31
2.4.4.	Componentes principales.....	33

2.5. TIPOS DE CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA EN CELULOSA ARAUCO	33
2.5.1. Funcionamiento del sistema de transporte de biomasa.....	35
2.5.2. Función del silo de almacenamiento de biomasa	36
2.5.3. Funcionamiento del sistema de alimentación de los tornillos	36
2.6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	37
2.6.1. Análisis de fallas y eficiencia	40
2.6.2. Humedad de la biomasa.....	41
CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE MEJORA EN LOS ROMPEDORES DE BIOMASA.....	43
3.1. INTRODUCCIÓN DE LA PROPUESTA.....	44
3.1.1. Objetivos de la propuesta de mejora.....	44
3.1.2. Descripción y diseño de la propuesta de rompedores de biomasa.....	45
3.1.3. Material utilizado en los rompedores de biomasa	46
3.1.4. Función de los rompedores de biomasa.....	46
3.1.5. Optimización de la implementación en el diseño del rompedor de biomasa.....	47
3.1.6. Implementación de la propuesta	48
CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	50
4.1. COSTO DE MANTENIMIENTO Y PRODUCCIÓN POR DETENCIONES NO PROGRAMADAS.....	51
4.1.1. Estimaciones de los costos por el impacto en las detenciones no programadas en la planta	52
4.2. BENEFICIOS ECONÓMICOS ESTIMADOS.....	55
4.2.1. Reducción estimada de las detenciones no planificadas.....	55
4.2.2. Ahorros estimados en costos de mantención correctiva	56

4.2.3. Productividad estimada.....	56
4.2.4. Reducción de costos estimada por operaciones en general	57
CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- 1: Mantenimiento MTBF.	9
Figura 1- 2: Mantenimiento MTTR.	10
Figura 1- 3: Disponibilidad.	10
Figura 1- 4: Confiabilidad.	11
Figura 1- 5: Diagrama de Ishikawa.	12
Figura 1- 6: Diagrama de Pareto.	13
Figura 1- 7: Proceso de Soldadura por arco eléctrico.	15
Figura 1- 8: Proceso de soldadura por plasma.	15
Figura 1- 9: Proceso de soldadura TIG.	16
Figura 1- 10: Acero Hardox 450.	17
Figura 1- 11: Propiedades mecánica.	18
Figura 2- 1: Mapa de Celulosa Arauco en el mundo.	21
Figura 2- 2: Imagen aérea de planta Celulosa Arauco línea 3.	22
Figura 2- 3: Imagen satelital de ubicación Planta Arauco línea 3.	23
Figura 2- 4: Proceso de revalorización de residuos.	25
Figura 2- 5: Imagen de planta Celulosa Arauco línea 3 en plena producción.	26
Figura 2- 6: Flujo del proceso productivo de Celulosa Arauco.	29
Figura 2- 7: Logo empresa Raumaster.	31
Figura 2- 8: Rompedores de biomasa.	32
Figura 2- 9: Componentes principales del tornillo.	33
Figura 2- 10: Corteza de Eucalyptus globulus.	34
Figura 2- 11: Cinta transportadora de biomasa.	35
Figura 2- 12: Silo de almacenamiento de caldera de poder.	36
Figura 2- 13: Tornillo al interior del silo.	37
Figura 2- 14: Cambio de tornillo por falla.	39
Figura 2- 15: Tornillo sin fin al interior de silo en PGP.	39
Figura 2- 16: Humedad de biomasa combinado con lodo.	42

Figura 3- 1:Diseño de la propuesta de rompedores de biomasa.	45
Figura 3- 2: Implementación de los rompedores.	47
Figura 3- 3: Rompedor incorporado al albe del tornillo sin fin.	48
Figura 3- 4: Proceso de soldadura en terreno.	49
Figura 3- 5: Montaje de rompedores al interior de silo.	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos de fallas tornillo sin fin.	40
Tabla 2 Costo total de materiales para reparación de tornillo por detención.	51
Tabla 3 Costo total de reparación por detención.	52
Tabla 4 Costos estimados por detención de 12 horas.	54
Tabla 5 Costo estimado de mano de obra por detención programada.	56

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1- 1: Grafico de Pareto fallas tornillo.	41
Gráfico 1- 2:Costo estimado por 12 horas.	55

SIGLAS Y SIMBOLOGÍAS

MTTF: Tiempo medio para reparar.

MTBF: Tiempo medio entre falla.

SEN: Sistema Eléctrico Nacional.

ROI: Retorno de la inversión.

SMAW: Soldadura por arco eléctrico

MIG: Gas inerte metálico

TIG: Tungsteno inerte gas

HBW: Valor de dureza Brinell.

CLP: Pesos Chilenos

$\geq$: Mayor o igual

%: Porcentaje

°: Grados

kWh: Kilovatios hora

MPa: Mega Pascal

MW: Megavatios

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de titulación tiene como objetivo abordar y proponer una solución técnica a un problema crítico que afecta la operación eficiente de la Planta Celulosa Arauco Línea 3, específicamente en su sistema de alimentación de biomasa, que es fundamental para la operación de la caldera de poder. Esta planta, perteneciente a Celulosa Arauco, una de las empresas forestales más importantes de América Latina, destaca por su compromiso con la sostenibilidad, la innovación tecnológica y la excelencia en la producción de celulosa y productos derivados de la madera.

La caldera de poder de la Línea 3 cumple un rol estratégico, ya que genera energía renovable a partir de biomasa, abasteciendo las necesidades energéticas del proceso productivo y, al mismo tiempo, inyectando excedentes al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Sin embargo, este sistema enfrenta desafíos operativos significativos debido a la naturaleza abrasiva y heterogénea de la biomasa utilizada como combustible, la cual incluye principalmente *Eucalyptus globulus* y, en algunos casos, mezclas con lodo industrial. Estas condiciones adversas generan un desgaste acelerado en componentes críticos como los tornillos sin fin y los rompedores de biomasa, elementos esenciales para garantizar un flujo continuo y eficiente de combustible hacia la caldera.

El desgaste prematuro de estos componentes ocasiona detenciones no programadas, incrementando los costos de mantenimiento correctivo, reduciendo la productividad y afectando la sostenibilidad operativa del sistema. Este problema no solo representa una limitación técnica, sino que también tiene implicaciones económicas y ambientales, ya que la falta de un flujo constante de biomasa afecta la eficiencia energética de la planta y aumenta las emisiones de gases asociados con la interrupción del sistema.

En este contexto, el presente trabajo propone una solución integral para optimizar el diseño y desempeño de los rompedores de biomasa y los tornillos sin fin. La propuesta incluye el uso de materiales de alta resistencia, como el acero Hardox 450, conocido por su capacidad para soportar abrasión extrema y prolongar la vida útil de los componentes. Además, se plantea la incorporación de tecnologías avanzadas de mantenimiento predictivo, que permitirán monitorear en tiempo real el estado de los equipos y anticiparse a fallas antes de que estas se conviertan en problemas mayores.

El informe se estructura en varias secciones. En primer lugar, se presenta un marco teórico que analiza los principios del mantenimiento industrial, su evolución y las estrategias más adecuadas para enfrentar los desafíos que plantea el desgaste en sistemas críticos. También se abordan las propiedades de los materiales utilizados en los equipos sometidos a condiciones severas de operación y se discuten las tecnologías de monitoreo aplicables en entornos industriales. En segundo lugar, se realiza un diagnóstico de la situación actual en la caldera de poder, identificando las principales fallas y sus causas raíz. Finalmente, se presenta una propuesta técnica y económica para mejorar el sistema de alimentación de biomasa, respaldada por un análisis detallado del retorno de inversión (ROI) que demuestra la viabilidad y los beneficios esperados.

Este trabajo no solo busca solucionar una problemática específica en la Línea 3 de Celulosa Arauco, sino también generar un impacto positivo en la industria forestal y energética en general. Las soluciones planteadas son escalables y replicables en otras plantas industriales que enfrentan desafíos similares, contribuyendo al desarrollo de procesos más eficientes y sostenibles. Además, el proyecto refleja el compromiso de la ingeniería de mantenimiento industrial con la búsqueda de soluciones innovadoras que equilibren la eficiencia operativa, la sostenibilidad ambiental y la reducción de costos.

En conclusión, este trabajo de titulación se posiciona como una contribución significativa tanto para la operación de la Planta Celulosa Arauco Línea 3 como para el sector industrial en su conjunto. A través de la implementación de las mejoras propuestas, se espera no solo resolver una problemática técnica, sino también consolidar a Celulosa Arauco como un referente en la gestión eficiente y sostenible de procesos críticos, sentando un precedente para futuras investigaciones y desarrollos en el ámbito del mantenimiento industrial.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Aumentar la disponibilidad y confiabilidad: Se busca disminuir las detenciones no programadas y el tiempo de inactividad, lo que se traduciría en una mayor productividad de la planta en Celulosa Arauco línea 3.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el diseño actual de los rompedores de corteza y su funcionamiento en el proceso de alimentación.
- Identificar los problemas y limitaciones del diseño actual que afectan la eficiencia y rendimiento del sistema.
- Desarrollar un nuevo diseño de rompedor de corteza basado en principios de ingeniería y feedback del personal operativo.
- Evaluar el impacto de la propuesta de mejora en términos de costos operativos, eficiencia de alimentación y reducción de paradas no planificadas.

ALCANCE Y LIMITACIONES

- Costos:
Estimación de costos para el diseño y posible implementación de mejora.
- Área de análisis:
Evaluación de diseño mecánico, eficiencia operativa y análisis de costos.
- Propuesta de implementación:
Recomendación para la implementación gradual del nuevo diseño.
- Sostenibilidad:
Consideración de aspectos ambientales y sostenibilidad del nuevo diseño.
- Acceso a datos:
Limitaciones en la obtención de datos históricos de fallas y tiempo de inactividad.
- Recursos disponibles:
Presupuesto limitado para la implementación de cambios.
- Tiempo de estudio:
La investigación se debe realizar en un periodo específico que pueda restringir la profundidad de análisis.
- Condiciones operativas:
Las variaciones en el tipo de corteza y sus características pueden influir en la efectividad del diseño propuesto.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1. GENERACIONES DEL MANTENIMIENTO

El mantenimiento es una práctica que permite a las empresas de los diferentes rubros industriales el poder optimizar el tiempo en sus procesos productivos, ya que con un buen mantenimiento la entidad logra disminuir las fallas que se puedan generar, pérdida innecesaria, ya sea en recursos económicos o materiales. Debido a esto, el mantenimiento ha ido evolucionando durante toda su historia y hasta la actualidad.

1.1.1. Mantenimiento

El mantenimiento industrial es el conjunto de actividades que realizamos para que un equipo o sistema pueda funcionar correctamente y de manera segura a lo largo del tiempo. En pocas palabras, es como poder cuidar nuestras herramientas o dispositivos para que puedan durar aún más y funcionen mejor con menos fallas en los momentos más importantes de la producción, es crucial para asegurar la continuidad operativa y minimizar las detenciones no programadas. Existen varios tipos de mantenimiento empleados en la planta:

1.1.2. Finalidad

La finalidad del mantenimiento es tener en condiciones óptimas los equipos, componentes e instalaciones, como también reparar a tiempo y de la mejor forma las averías para poder brindar la máxima capacidad de producción a la organización, aplicando técnicas que brindan un control eficiente y eficaz del equipo e instalación.

1.1.3. Objetivos del mantenimiento

El objetivo para el cual se genera un mantenimiento es mantener su disponibilidad, manteniendo los componentes y la máquina en óptimas condiciones para que, cuando se requiera su utilización, funcione correctamente. De igual forma encontramos la confiabilidad, la cual busca que los equipos e instalaciones duren el mayor tiempo prolongado de funcionamiento, pero de forma segura y adecuada. Luego, estaría la máxima

productividad, lo cual, con un buen mantenimiento, llevaría una buena confiabilidad y disponibilidad, llevando consigo un aumento de productividad y de la mano mayor rentabilidad. No dejando afuera entraría la reducción de costos, ya que con un correcto mantenimiento podemos disminuir las fallas graves e imprevistas y a la vez el costo que conllevan.

1.1.4. Mantenimiento predictivo

Es una de las estrategias del mantenimiento, basada en el monitoreo constante o diario de todos los equipos, para poder predecir cuándo estos podrían comenzar a fallar. Se utilizan datos obtenidos mediante sensores, análisis de vibraciones, temperaturas, ultrasonido, entre otros, para poder determinar el estado real de todos los equipos y así poder planificar las posibles intervenciones justo antes de que pueda ocurrir algún evento. Alguno de los métodos más utilizados para poder llevar a cabo este tipo de mantenimiento son los siguientes:

- Análisis de vibraciones.
- Tintas penetrantes.
- Termografías.
- Ultrasonido.
- Análisis de aceites.

1.1.5. Mantenimiento preventivo

Es esencial para evitar fallas y es considerada una estrategia de mantenimiento planificado cuyo objetivo es poder reducir la probabilidad de fallas en la gran mayoría de los equipos mediante la realización de inspecciones semanales en donde se ajustan los equipos, se lubrican, se limpian y se reemplazan mediante una programación para detener antes de su falla. Este tipo de mantenimiento se basa en el conocimiento del comportamiento de los equipos y de las estadísticas de su vida útil de sus partes.

1.1.6. Mantenimiento correctivo

El mantenimiento correctivo, también llamado mantenimiento reactivo, consiste en la acción puntual que se realiza sobre una máquina o equipo que ha dejado de funcionar. Este puede variar en su gravedad, de leve a grave. Usualmente suelen ser averías de difícil arreglo. Este mantenimiento se puede dividir en dos, uno de ellos es el mantenimiento correctivo programado, donde se sabe con antelación qué es lo que se debe realizar, de modo que, cuando se pare el equipo para efectuar la reparación, se disponga del personal, repuesto y documentos técnicos necesarios para que se lleve a cabo correctamente. En el otro caso está el mantenimiento correctivo no planeado, el cual ocurre de emergencia, debiendo efectuarse de manera sorpresiva, ya sea por una avería imprevista a reparar lo más pronto posible o por una condición que hay que reparar.

- Se aprovecha el mayor tiempo de vida útil del equipo, ya que al trabajar a la falla se utiliza toda la capacidad productiva del equipo sin que presente interrupciones para intervenirlo.
- No necesita un análisis detallado para saber que falló, ya que se identificará de inmediato qué componente o sistema no funciona, por lo tanto, el tiempo de análisis disminuirá.
- En ocasiones, los gastos son menores por el hecho de reparación.

1.2. INDICADORES DEL MANTENIMIENTO

1.2.1. Tiempo medio entre fallas (Mean time between failures)

El MTBF o tiempo medio entre fallos, pertenece a los indicadores más relevantes para la zona de mantenimiento. Se apoya en medir el tiempo total de buen desempeño medio entre cada fallo de un equipo reparable, convirtiéndose en un instrumento óptimo para medir la confiabilidad de la máquina.

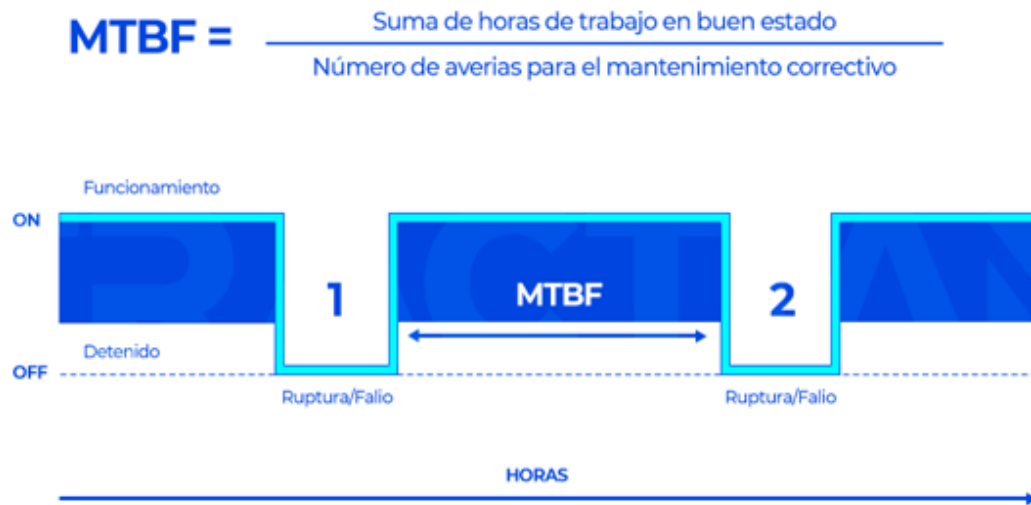


Figura 1-1: Mantenimiento MTBF.

Fuente: Tractian.

1.2.2. Tiempo medio para reparar (Mean time to repair)

MTTR o tiempo medio para reparar, está bastante asociado a la mantenibilidad, o sea, a la facilidad de un equipo de mantenimiento para hallar y reubicar un equipo en condiciones de realizar sus funcionalidades luego de un fallo.

Errores cometidos utilizando este indicador

- No existe un valor ideal o referencia para el MTTR.
- Exigir que los equipos de mantenimiento mantengan un MTTR bajo puede inducirlos a cometer errores.

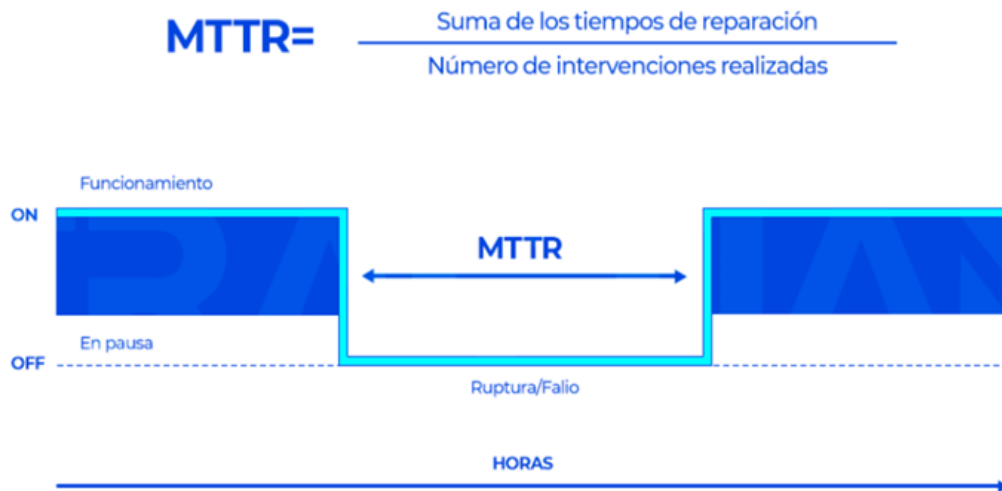


Figura 1-2: Mantenimiento MTTR.

Fuente: Tractian.

1.2.3. Disponibilidad

Es la capacidad de un elemento de estar en condiciones de ejecutar una cierta función en un instante dado, o durante un intervalo de tiempo determinado.

Para optimizar la disponibilidad de mantenimiento, se pueden seguir indicadores clave de rendimiento (KPIs) como el MTBF (Mean Time Between Failures) y el MTTR (Mean Time To Repair).

La disponibilidad está relacionada con la confiabilidad.

$$\text{DISPONIBILIDAD} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \times 100$$

Figura 1- 3: Formula de Disponibilidad.

Fuente: Tractian.

1.2.4. Confiabilidad

Es la probabilidad de que un elemento desempeñe su función especificada en el proyecto, de acuerdo con las condiciones de operación, en un intervalo específico de tiempo.

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

λ = tasa de fracaso $\lambda(t) = \frac{1}{\text{MTBF}}$	t = tiempo Debe seguir la unidad MTBF (horas, días...)	e = El Número de Euler 2,71
---	---	---

Figura 1-4: Fórmula de Confiabilidad.

Fuente: Tractian.

1.3. TIPOS DE DIAGRAMAS

1.3.1. Diagrama de Ishikawa

El Diagrama de Ishikawa, o también conocido como diagrama de pescado, es una herramienta que identifica problemas de calidad y les da solución al representar de forma gráfica los factores que involucran la ejecución de un proceso, basada en la premisa de que todo problema tiene una causa de algo que está mal en un proceso, se identifica de dónde surgen las acciones que están conformando ese problema. Este método se puede adaptar a cualquier industria, actividad, área, contexto o situación. Los elementos que conforman el diagrama Ishikawa son tres la cabeza, las espinas y las espinas menores.

1. La cabeza: Emerge de la espina central y en esta parte se representan los problemas.

2. Las espinas: Salientes de la espina central. Pueden existir muchas o pocas espinas, dependiendo de las posibles causas que estén provocando el problema en cuestión.
3. Las espinas menores: Las espinas grandes también incluyen espinas más pequeñas, con las que se determinan las causas menores.

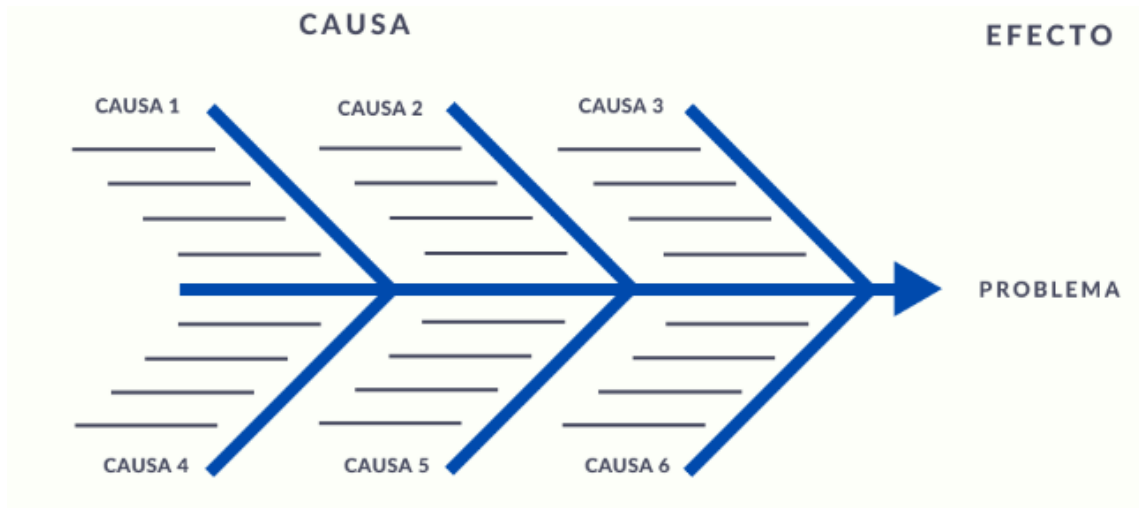


Figura 1-5: Diagrama de Ishikawa.

Fuente: Pandape.

1.3.2. Diagrama de Pareto

Al tener el historial de fallas y graficarlas mediante el diagrama de Pareto, se logra obtener el 20% de las causas que se nombran a continuación, que son las siguientes. Aglomeración de corteza y palos sobre tamaño, por lo tanto, se debe enfocar las mantenciones y mejoras futuras en estas dos fallas más importantes.

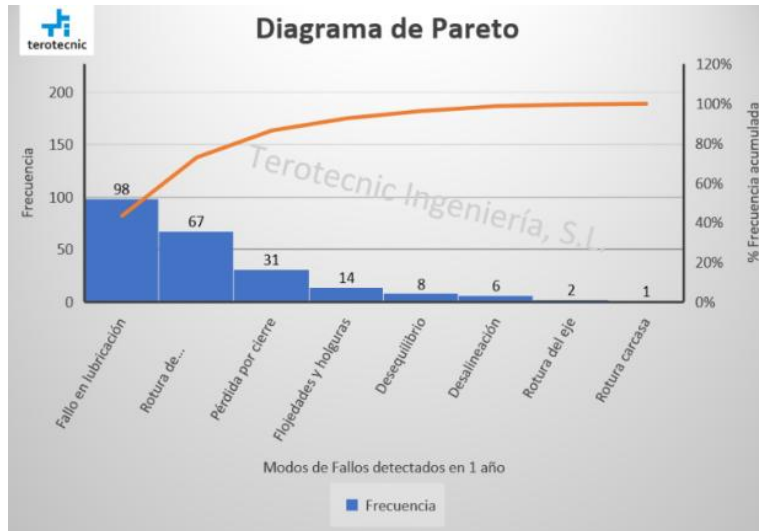


Figura 1-6: Diagrama de Pareto.

Fuente: Trotecnic Ingeniería.

1.3.3. Los cinco ¿Por qué?

El método de los cinco porqués es una técnica que permite llegar a la causa raíz de un problema al hacer la pregunta "¿Por qué?" repetidamente, generalmente cinco veces. Este método ayuda a identificar las causas subyacentes de un problema.

Aplicación de los Cinco Porqués en el desgaste de los equipos:

1. ¿Por qué ocurren las paradas no planificadas?

Porque los tornillos sin fin y rompedores de corteza sufren un desgaste prematuro.

2. ¿Por qué sufren desgaste prematuro?

Porque la biomasa de *Eucalyptus globulus* contiene lodo y corteza, lo que genera una alta abrasión en los equipos.

3. ¿Por qué la biomasa tiene lodo y corteza dura?

Porque no se cuenta actualmente con un rompedor de corteza eficiente que pueda procesar adecuadamente los materiales duros.

4. ¿Por qué no hay un rompedor de corteza eficiente?

Porque el diseño actual de los rompedores no está optimizado para manejar la heterogeneidad de la biomasa.

5. ¿Por qué el diseño no está optimizado?

Porque el mantenimiento y las mejoras en el diseño no han sido implementados adecuadamente para prevenir el desgaste en condiciones operativas severas.

1.4. PROCESOS DE SOLDADURA APLICADA EN HARDOX 450

El proceso de soldadura aplicada en Hardox 450 es un proceso fundamental para mejorar la resistencia al desgaste y la durabilidad de los componentes en entornos industriales severos.

En el contexto de los tornillos sin fin y los rompedores de corteza, la soldadura dura (hardfacing) es fundamental para extender la vida útil de los componentes y garantizar un desempeño óptimo en condiciones adversas.

1.4.1 Tipos de soldaduras aplicadas

La soldadura aplicada, específicamente la soldadura dura, consiste en poder depositar un material con alta resistencia al desgaste por sobre todo en las superficies de un componente base. Este proceso consiste mayormente en poder mejorar la resistencia a la abrasión, corrosión o el impacto sin necesidad de reemplazar todos los componentes de la pieza a utilizar en el proceso.

1. Soldadura por arco eléctrico (SMAW, GMAW, FCAW):

Utiliza un electrodo revestido o alambre para aplicar material sobre la superficie.

Ventajas: Económico, ampliamente disponible, fácil de aplicar en campo.

Aplicación: Reparación y endurecimiento de tornillos sin fin y rompedores.

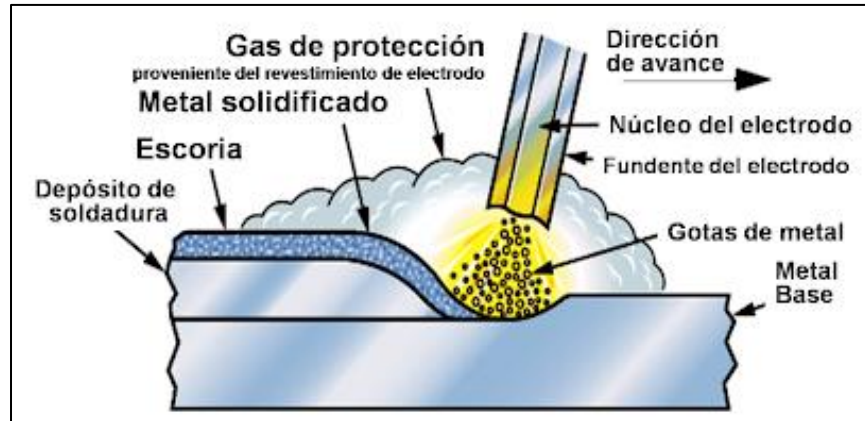


Figura 1-7: Proceso de soldadura por arco eléctrico.

Fuente: Rice.

2. Soldadura por plasma (PTA):

Deposita material de forma precisa utilizando un arco de plasma.

Ventajas: Excelente control, ideal para aplicaciones de alta precisión.

Aplicación: Endurecimiento de álabes en tornillos sin fin.

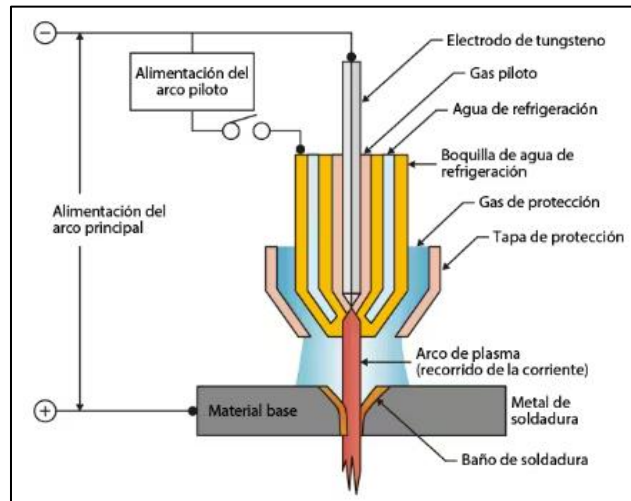


Figura 1-8: Proceso de soldadura por plasma.

Fuente: Rice

3. Soldadura TIG (GTAW):

Utiliza un electrodo de tungsteno no consumible y gas de protección.

Ventajas: Acabado de alta calidad, adecuado para trabajos en acero inoxidable.

Aplicación: Reparación de componentes críticos en sistemas de biomasa.

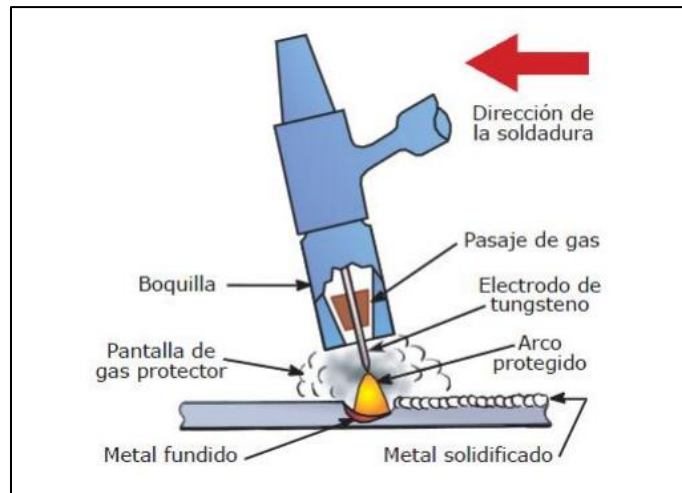


Figura 1-9: Proceso de soldadura TIG.

Fuente: Rice

1.4.2. Propiedades mecánicas del acero Hardox y composición química

Dureza: 450 HBW (Brinell Hardness Value).

Esto significa que puede resistir el desgaste por fricción y abrasión en condiciones extremas.

Es aproximadamente 3 veces más resistente al desgaste que un acero estándar.

Límite elástico: $\geq 1,250$ MPa.

Garantiza que el material pueda soportar altas cargas antes de deformarse.

Resistencia a la tracción: 1,400 - 1,600 MPa.

Permite que el material soporte tensiones extremas sin romperse.

Alargamiento a fractura: 10-12%.

Ofrece una cierta ductilidad, lo que lo hace menos propenso a fracturarse bajo impacto.



Figura 1-10: Acero Hardox 450.

Fuente: Láminas y aceros.

Conductividad térmica: Moderada, adecuada para soportar variaciones de temperatura sin afectar su resistencia estructural.

Resistencia al impacto: Gracias a su estructura martensítica, el Hardox 450 combina dureza y tenacidad, resistiendo impactos en condiciones de alta abrasión.

Propiedades mecánicas			
Valor típico de placa de 25 mm de espesor	Limite elástico	Carga de rotura	Alargamiento
	R _e	R _m	A _s
	MPa	MPa	%
	1200	1400	10
Resiliencia			
Valor típico de placa de 25 mm de espesor	Ensayo de temperatura	Energía de impacto Charpy -V probeta longitudinal	
	°C	J	
	-40	40	

Figura 1-11: Propiedades mecánicas.

Fuente: Vior Steel.

Propiedades del proceso de soldadura:

Soldabilidad: Compatible con técnicas de soldadura como MIG, MAG, TIG y arco eléctrico (SMAW).

Requiere cuidado en la selección del material de aporte (como electrodos tipo 309) y en el control de la temperatura para evitar grietas.

Aunque no es un acero inoxidable, su resistencia al desgaste lo hace menos susceptible a la corrosión en aplicaciones industriales donde se manejan partículas abrasivas húmedas o mezcladas con lodo.

1.5. PRINCIPALES FUERZAS APLICADAS EN LOS EQUIPOS ROTATORIOS

1.5.1. Fuerza de corte

Origen: Generada por los rompedores de corteza y los bordes de los álabes del tornillo sin fin al fragmentar y desplazar partículas de biomasa.

Impacto:

Desgaste en las superficies de contacto (ejemplo: acero Hardox 450).

Incremento en la potencia requerida por el sistema cuando la biomasa está compactada o contiene lodo.

1.5.2. Fuerza de tracción

Origen: Necesaria para mover la biomasa a lo largo del tornillo sin fin.

Impacto:

Incremento de las tensiones en el eje del tornillo, especialmente cuando el material se acumula. Sobrecargas en los motores y reductores si la biomasa es demasiado densa.

1.5.3. Fuerza axial

Origen: Actúa a lo largo del eje del tornillo sin fin debido al empuje generado al mover la biomasa hacia adelante.

Impacto:

Compresión y posibles deformaciones en el eje del tornillo.

Transversal del tornillo.

1.5.4. Fuerza de fricción

Origen: Ocurre entre la biomasa y la superficie interna del tornillo y del silo.

Impacto:

Incremento en el desgaste del revestimiento del tornillo.

CAPÍTULO 2: SITUACIÓN ACTUAL

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Celulosa Arauco es una de las principales empresas del sector forestal y de celulosa en América Latina, perteneciente al grupo industrial Arauco, que forma parte de la Corporación Industrial de la Madera. Fundada en el año 1979, la empresa se ha consolidado como un actor clave en la producción de celulosa, papel y los productos derivados de la madera, con un fuerte compromiso hacia la sostenibilidad y la innovación. Su sede se encuentra en Chile y cuenta con operaciones en varios países, lo que le permite tener una presencia más significativa en el mercado a nivel global.

Arauco cuenta con 5 plantas en Chile ubicadas en Constitución, Licancel, Valdivia, Arauco y Nueva Aldea. Además, cuenta con operaciones industriales y forestales por el mundo, como se puede apreciar en los siguientes mapas:

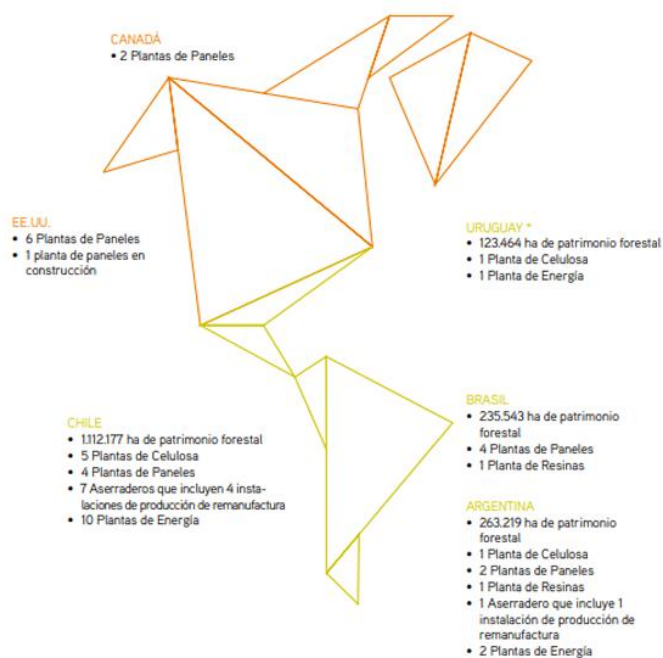


Figura 2-1: Mapa de Celulosa Arauco en el mundo.

Fuente: Reporte integrado Arauco 2017.

2.2. EMPRESA CELULOSA PLANTA ARAUCO LÍNEA 3

La planta de Celulosa Arauco está especializada en la producción de la más alta calidad, que es utilizada en la fabricación de papel y cartón. Sus productos incluyen celulosa para papel de impresión, papel higiénico, cartón y otros productos de papel. Además, la empresa también se dedica a la producción de productos químicos derivados de la celulosa, así como a la generación de energía a partir de la biomasa, lo que contribuye a su modelo de negocio sostenible.

La compañía está enfocada en la innovación constante, invirtiendo en la más alta tecnología y mejorando sus procesos productivos y energéticos que a su vez permiten reducir el impacto ambiental. Esto incluye el uso de prácticas de manejo forestal sostenible, que aseguran la conservación de los recursos naturales y a su vez también cuidar la biodiversidad.



Figura 2-2: Imagen aérea de planta Celulosa Arauco línea 3.

Fuente: Diario financiero.

2.2.1. Ubicación y capacidad de la planta línea 3

Planta de Celulosa Arauco, línea 3, se encuentra situada en la ciudad de Arauco, en la región del Biobío, Chile.

Esta planta se localiza cerca de la costa, lo que facilita la logística para la exportación de producto.

La Planta de Celulosa Arauco es parte del grupo Arauco y es una de las instalaciones más importantes del país en la producción de celulosa. Su enfoque en la modernización y sostenibilidad ha permitido a la planta mantener los más altos estándares de eficiencia operativa y producción.

Arauco: MAPA inicia sus operaciones.

La inversión más importante en los 52 años de historia de ARAUCO ya es una realidad. Tras 11 años de trabajo continuo, el Proyecto de Modernización Planta Arauco, MAPA. Produce sus primeros fardos de celulosa.

Cuando son la 1:43 am del 20 de enero del 2023. Mientras el país se encuentra bajo el más absoluto silencio de una calurosa noche estival. ARAUCO está por cumplir un hito histórico: En el proyecto Modernización y Ampliación Planta Arauco, se produce su primer fardo de celulosa. Después de 11 años de intenso trabajo.



Figura 2- 3: Imagen satelital de ubicación Planta Arauco línea 3.

Fuente: Revista corporativa de la empresa Copec.

2.2.2. Compromiso con la sostenibilidad

Uno de los pilares más fundamentales en la producción de celulosa es su compromiso con la sustentabilidad. La empresa ha implementado prácticas responsables en la generación de sus bosques, asegurando que la reforestación y el manejo de recursos se realicen de manera equilibrada. Además, la planta de celulosa Arauco ha adoptado políticas de reducción de emisiones y gestión de residuos, con lo que esto busca poder minimizar su huella ambiental.

La compañía también busca involucrar iniciativas sociales y comunitarias que apoyan el desarrollo de las comunidades locales donde opera. Esto incluye los programas de educación, salud y el desarrollo económico, que busca el poder mejorar la calidad de vida de las personas y fomentar un entorno de colaboración.

2.2.3. Estrategia de sustentabilidad

En Arauco, nuestro enfoque hacia la sustentabilidad está profundamente arraigado en el principio de ser renovable para una vida mejor. Esto se refleja en un plan que tiene como objetivo trazar el sendero de las acciones y toma de decisiones de la compañía, y así materializar nuestro propósito.

Desde nuestro punto de vista, la sustentabilidad significa proporcionar soluciones que mejoren la calidad de vida de las personas, a través de una amplia gama de productos y alternativas sustentables, elaborados a partir de un recurso renovable como la madera.

Así, logramos impactar positivamente en las industrias de papel, vestuario, construcción, embalaje, mueblería y energía.

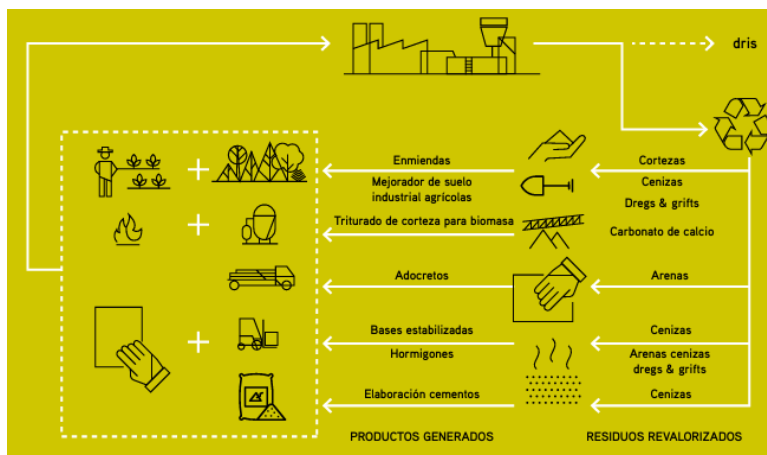


Figura 2-4: Proceso de revalorización de residuos.

Fuente: Revista corporativa de la empresa Copec

Nuestro modelo sustentable describe nuestras acciones y compromisos para contribuir a las personas y al planeta mediante nuestros bosques, procurando que estos conserven su biodiversidad, productividad, capacidad de regeneración y vitalidad, para que puedan cumplir, ahora y en el futuro, sus funciones ecológicas, económicas y sociales relevantes. Como compañía global, mantenemos nuestro enfoque hacia la sustentabilidad, dedicándonos a impactar positivamente en las personas y el planeta.

2.2.4. Estrategia de sostenibilidad

Trabajamos para consolidar una economía basada en recursos renovables y a partir de estos, desarrollar productos que mejoran la calidad de vida de millones de personas en el mundo, a través de una gestión sustentable de nuestras operaciones y creando el máximo valor a partir del patrimonio forestal.

Combinando ciencia y energía e innovación para desplegar todo el potencial de nuestras plantaciones. Gestionando de manera responsable nuestras operaciones, mediante las mejores prácticas ambientales, y velando por la salud, seguridad y desarrollo de las personas que integran Arauco.

Desarrollando materiales y productos con estándares máximos y con foco en la calidad y entregando un servicio de calidad a nuestros clientes. Siendo un actor virtuoso en los entornos de los que formamos parte, para ser un agente activo en su desarrollo económico y social.

2.2.5. Capacidad de producción

Esta planta tiene una capacidad de producción significativa de 2,1 millones de toneladas de celulosa al año, especializada en la fabricación de celulosa, que se utiliza principalmente en la industria del papel. Aunque la capacidad específica varía según las operaciones, el enfoque de Arauco es siempre estar a la máxima eficiencia y la sostenibilidad.

La planta de Celulosa Arauco también cuenta con una caldera de poder y una caldera recuperadora, dos turbinas y dos generadores. La energía eléctrica que producen las unidades generadoras abastece el proceso productivo y el exceso se inyecta al sistema eléctrico, que tiene la capacidad de generar un excedente de energía renovable de aproximadamente 132 megavatios. La planta produce energía eléctrica y vapor a partir de la quema de sus desechos, lo que permite abastecer el proceso de producción de celulosa; el excedente de energía se inyecta al sistema eléctrico nacional (SEN) a través de la S/E Lagunillas en 220 kV.

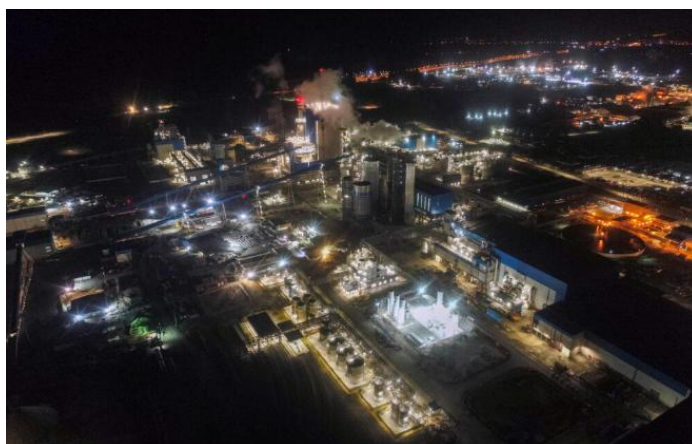


Figura 2-5: Imagen de planta Celulosa Arauco línea 3 en plena producción.

Fuente: Revista corporativa de Copec.

2.3. PROCESO PRODUCTIVO DE LA EMPRESA

El proceso productivo de la planta Celulosa Arauco se basa principalmente en la transformación de la materia prima, que es la madera de Eucalyptus, en celulosa de alta calidad. Este proceso se lleva a cabo en varias etapas, cada una de las cuales es crucial para garantizar la eficiencia y sostenibilidad del producto final. La planta se destaca por su compromiso con la innovación y la reducción del impacto ambiental, implementando tecnologías avanzadas y principalmente prácticas sostenibles en cada una de sus fases de la producción.

Recepción y almacenamiento de la materia prima: La producción comienza con la recepción de la madera, que es transportada desde los bosques esta extracción es realizada de manera sostenible. Una vez que la materia prima se encuentra en planta, se clasifica y se almacena adecuadamente para su posterior procedimiento.

Desmenuzamiento: En esta etapa, la madera se desmenuza en astillas mediante las maquinarias especializadas. Este proceso reduce el tamaño de la materia prima, facilitando su tratamiento en las siguientes fases.

- **Preparación de la madera**

En la etapa principal del proceso productivo se empieza con el acopio o almacenamiento de los troncos donde a continuación son descortezados y astillados para la creación de la pulpa.

- **Caldera de poder**

La corteza que no entró en el área de preparación de la madera, es quemada en la caldera para generar vapor y energía eléctrica.

- **Digestor**

Las astillas clasificadas para la preparación de la madera son introducidas a los digestores para su cocción; después se mezcla con licor blanco para separar las

fibras que mantienen la lignina de la madera unidas, obteniendo así la pulpa de celulosa cruda.

- **Evaporadores**

Las astillas proceden a los evaporadores, los que retiran el agua contenida en el licor negro proveniente de la cocción y lavado, para la producción de licor negro concentrado, apto para la combustión en la caldera recuperadora.

- **Caldera recuperadora**

Se traslada el licor negro a la caldera recuperadora, la cual lo quema, y el vapor generado es enviado a las distintas áreas del proceso y a una turbina para producir energía eléctrica. Además, en la caldera se genera un fundido que, al disolverlo, da origen al licor verde.

- **Caustificación y horno de caldera**

El licor verde proveniente de la caldera recuperadora, es transformado en licor blanco, el cual es utilizado nuevamente en el proceso de cocción.

- **Blanqueo**

Mediante la adición de elementos químicos, como son el dióxido de cloro y peróxido, se blanquea la pulpa cruda proveniente del digestor.

- **Embalaje**

Se forma y se seca la hoja de celulosa para posteriormente cortarla y embalarla en fardos de 250 kilos.

- **Producto final**

Los fardos son transportados a los centros de ventas y distribución Arauco.

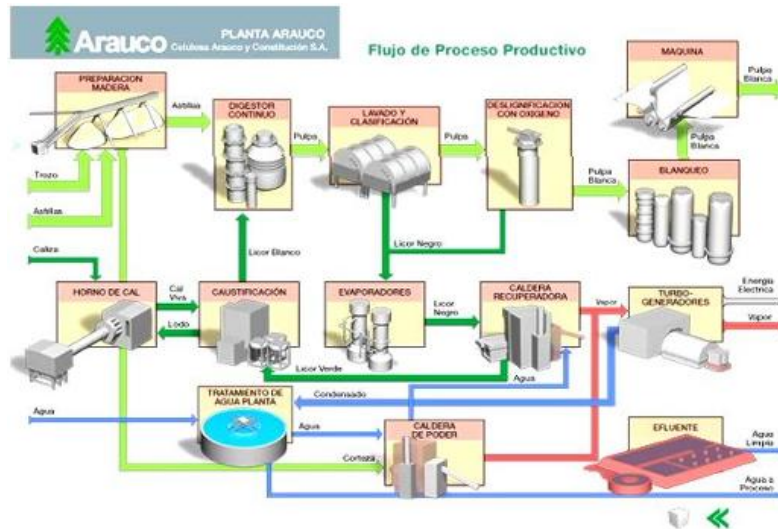


Figura 2-6: Flujo del proceso productivo de Celulosa Arauco.

Fuente: Revista corporativa de la empresa Copec

2.3.1. Calidad de la biomasa

La biomasa utilizada es *Eucalyptus globulus* como insumo principal. En el sistema de alimentación puede tener una calidad muy variable, lo que afecta directamente el rendimiento del tornillo sin fin y los rompedores de corteza.

2.3.2. Mezcla con lodo

En muchos casos, la biomasa se mezcla con lodo proveniente de los desechos en el proceso industrial, lo que incrementa su densidad y agresividad.

Impacto en el sistema:

Desgaste acelerado: El lodo contiene partículas abrasivas que erosionan las superficies del tornillo y los rompedores.

Corrosión: La mezcla húmeda puede generar condiciones corrosivas, afectando especialmente las uniones y zonas críticas del sistema.

2.3.3. Impacto ambiental y normativas

Sustentabilidad y regulación

La biomasa, como fuente de energía renovable, desempeña un papel fundamental en la transición hacia un modelo energético más sostenible.

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero
- Aprovechamiento de los residuos
- Conservación de recursos no renovables
- Normas ambientales sobre emisiones
- Certificaciones de sostenibilidad

2.4. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS QUE ALIMENTAN LA CALDERA DE PODER

2.4.1. Fabricante de los equipos

Raumaster Oy, fundada en 1984, es una empresa finlandesa reconocida por el suministro de sistemas avanzados de manejo de materiales, especialmente para las industrias de procesamiento de madera y generación de energía. A lo largo de los años, se ha consolidado como líder global en su sector, ofreciendo soluciones que garantizan alta calidad, confiabilidad y durabilidad.

La empresa se especializa en el diseño y fabricación de equipos como transportadores, sistemas de alimentación de combustible, manejo de cenizas y soluciones de transporte neumático, adaptados a las necesidades específicas de sus clientes. Con más de 3.500 proyectos entregados a nivel mundial, Raumaster ha demostrado su capacidad para operar de manera eficiente y confiable en diversos entornos industriales.



Figura 2-7: Logo de la empresa Raumaster.

Fuente: Bosque internacional.

2.4.2. Principales productos

Raumaster Oy es una empresa finlandesa líder en el diseño y fabricación de sistemas avanzados de manejo de materiales para las industrias de procesamiento de madera, generación de energía y papel. Sus principales productos incluyen:

- Sistema de manejo de combustible y cenizas.
- Sistema de transporte neumático.
- Soluciones para la industria de la celulosa.
- Equipos rotatorios, trituradores y almacenamiento.

2.4.3. Diseño actual de tornillo de alimentación y rompedores de biomasa

Los rompedores de corteza son dispositivos mecánicos diseñados para fragmentar la biomasa, como la corteza de un árbol, el cual es fragmentado en piezas más pequeñas y manejables.

Son herramientas diseñadas para utilizarlas en mecanismos rotativos o de impacto para desmenuzar y homogenizar la biomasa.

Su función principal es facilitar el transporte de la biomasa al reducir el tamaño de las partículas, previniendo los atascos y la acumulación en los sistemas de alimentación, como tornillos sin fin y silo.

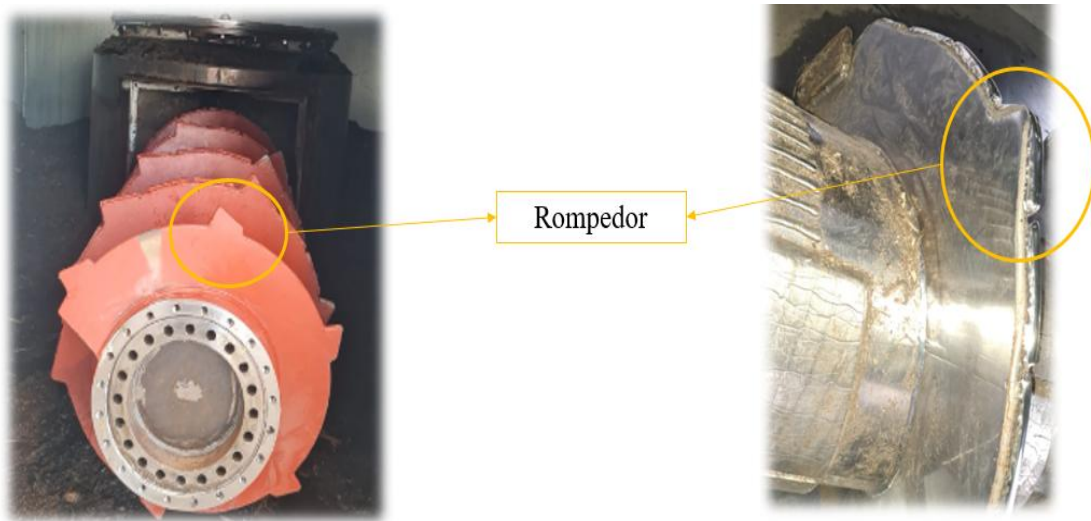


Figura 2-8: Rompedores de biomasa.

Fuente: Propia.

2.4.4. Componentes principales

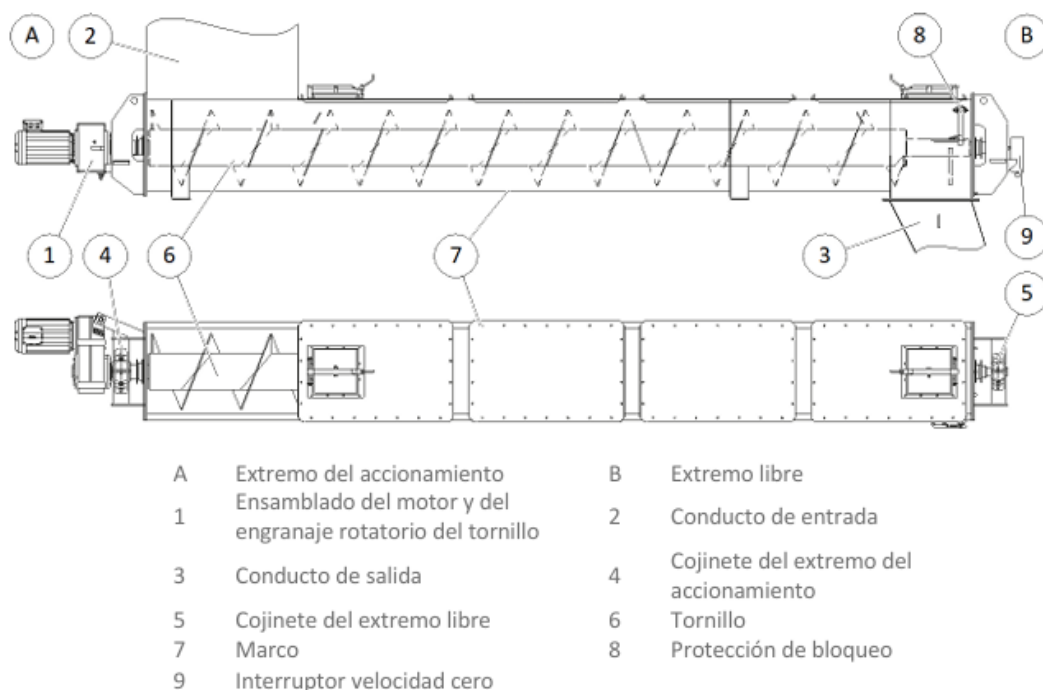


Figura 2-9: Componentes principales del tornillo.

Fuente: Manual de mantenimiento y servicio Valmet.

2.5. TIPOS DE CARACTERÍSTICAS DE LA BIOMASA EN CELULOSA ARAUCO

En Celulosa Arauco, la biomasa utilizada proviene principalmente de procesos forestales e industriales, como los residuos del procesamiento de madera y Eucalyptus.

Características:

Alta agresividad debido a su contenido de partículas minerales.

Baja densidad energética si contiene humedad excesiva.

Uso: Alimentación en calderas para generar vapor y energía.



Figura 2-10: Corteza de Eucalyptus globulus.

Fuente: Botanic Serrat.

Lodos del proceso

Mezcla de residuos orgánicos e inorgánicos generados en los sistemas de tratamiento de aguas.

Contiene un alto nivel de humedad, lo que reduce su eficiencia energética. A menudo mezclado con biomasa sólida para facilitar su combustión.

Residuos de Eucalyptus

Biomasa de alta densidad energética, pero con variabilidad en tamaño y forma.

Genera problemas de transporte y desgaste debido a su dureza.

Lonjas y palos Sobre tamaño

Materiales fibrosos y de mayor tamaño que generan atascos y sobrecarga en los sistemas de alimentación. Requieren pretratamiento o fragmentación antes de su uso.

Ventajas de usar biomasa en Celulosa Arauco

Sostenibilidad: Reducción del uso de combustibles fósiles.

Valorización de residuos: Aprovechamiento de materiales desechados en procesos productivos.

Reducción de emisiones: La biomasa es considerada carbono neutro.

Eficiencia energética: Su integración con procesos industriales mejora la autonomía energética de la planta.

2.5.1. Funcionamiento del sistema de transporte de biomasa

El sistema de transporte de biomasa desde el área de almacenamiento hasta el silo funciona mediante una serie de equipos interconectados que aseguran un flujo continuo y eficiente de la biomasa.

Cintas transportadoras, estructura y movimiento, que están compuestas por bandas de caucho reforzadas que se mueven sobre rodillos. Son accionadas por motores eléctricos y diseñadas para soportar grandes volúmenes de biomasa.

Velocidad controlada, la cinta puede ajustarse según la cantidad de biomasa requerida en el silo, asegurando un suministro constante.



Figura 2-11: Cinta transportadora de biomasa.

Fuente: Freepik.

2.5.2. Función del silo de almacenamiento de biomasa

El silo de almacenamiento de biomasa en la caldera de poder tiene un papel fundamental dentro del sistema de generación de energía, siendo un componente clave para garantizar un suministro constante y eficiente de biomasa a la caldera. Sus principales funciones incluyen.

Capacidad de reserva; el silo permite acumular biomasa proveniente de las cintas transportadoras para disponer de una reserva suficiente que asegure la continuidad del proceso, incluso en caso de interrupciones en la alimentación.



Figura 2-12: Silo de almacenamiento de caldera de poder.

Fuente: Propia.

2.5.3. Funcionamiento del sistema de alimentación de los tornillos

Los tornillos sin fin y los tornillos gemelos son componentes claves en la alimentación de biomasa hacia la caldera de poder, su funcionamiento está diseñado para

garantizar un flujo constante, uniforme y controlado del combustible, para optimizar la eficiencia del sistema de combustión.

El tornillo sin fin transporta biomasa desde el silo de alimentación hacia las válvulas rotatorias o directamente al quemador. La rotación del tornillo impulsa el material a través de un tubo cerrado, previniendo los atascos y minimizando pérdidas de combustible. La velocidad del tornillo se ajusta de tal manera, según lo requerido por la caldera de poder, así regula la cantidad de biomasa suministrada y asegurando una combustión eficiente.



Figura 2-13: Tornillo al interior del silo.

Fuente: Propia.

2.6. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, la generación de energía a partir de biomasa representa una alternativa sostenible y renovable frente al uso de combustibles fósiles. Sin embargo, en sistemas industriales como el de Celulosa Arauco Línea 3, donde se utiliza biomasa de Eucalyptus como combustible principal, surgen desafíos importantes relacionados con la

eficiencia y confiabilidad del sistema de alimentación. Este sistema, compuesto por tornillos sin fin y rompedores de corteza, es crucial para garantizar un suministro constante de biomasa hacia la caldera de poder.

Uno de los principales problemas identificados es el desgaste prematuro de los componentes críticos, como los álabes helicoidales y los rompedores de corteza. Este desgaste es provocado por las condiciones abrasivas de la biomasa, que incluyen partículas grandes, humedad y residuos como lodo. Dicho desgaste genera fallas frecuentes en el sistema de transporte, ocasionando detenciones no programadas. Estas detenciones tienen un impacto significativo en la operación de la planta, ya que interrumpen la generación de energía y obligan al uso de combustibles fósiles como el Fuel Oil 5, lo que incrementa los costos operativos y las emisiones de gases contaminantes.

Las paradas no programadas del sistema de alimentación también afectan la capacidad de la planta para entregar energía al sistema eléctrico interconectado, reduciendo su eficiencia operativa y económica. A esto se suma el costo asociado a las reparaciones y reemplazos frecuentes de los componentes dañados, así como las pérdidas derivadas del tiempo de inactividad de la caldera.

Actualmente, no se dispone de un diseño optimizado de los rompedores de corteza ni de un sistema de alimentación adaptado a las características específicas de la biomasa utilizada. Esto evidencia la necesidad de un análisis exhaustivo del problema, considerando tanto las propiedades de la biomasa como las exigencias mecánicas del sistema. Además, es fundamental explorar la implementación de materiales más resistentes al desgaste, como el acero Hardox 450, y mejoras en el diseño de los componentes para reducir las fallas y garantizar un flujo continuo de biomasa.

En este contexto, la falta de soluciones efectivas genera una problemática de amplio alcance, que incluye el aumento.

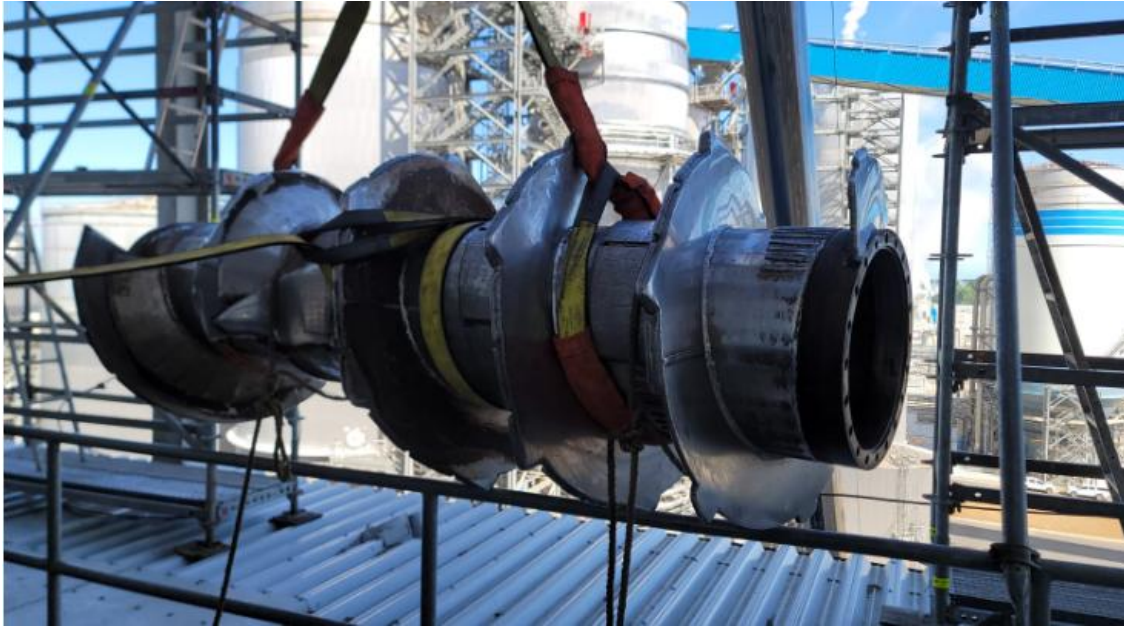


Figura 2-14: Cambio de tornillo por falla.

Fuente: Propia.



Figura 2-15: Tornillo sin fin al interior de silo en PGP.

Fuente: Propia.

2.6.1. Análisis de fallas y eficiencia

Factores que impactan el desempeño del sistema

La planta Línea 3 de Celulosa Arauco enfrenta un problema recurrente que afecta la disponibilidad de los equipos, especialmente en los sistemas de alimentación de biomasa que utilizan tornillos sin fin y rompedores de corteza. Las paradas no planificadas debido a fallas en los rompedores y desgaste prematuro de los tornillos sin fin generan altos costos operativos y reducción en la eficiencia operativa de la planta. Este problema es en gran parte el resultado de la heterogeneidad de la biomasa (mezcla de Eucalyptus, lodo y aserrín) y las limitaciones de diseño en los equipos.

Tabla 1

Datos de fallas tornillo sin fin.

Fallas	Cantidad de Fallas	%	%Acumulado
Aglomeración de corteza	977	51%	51%
Palos/Sobre tamaño	380	20%	70%
Desacople/Trabamiento de equipo	265	14%	84%
Lonjas	194	10%	94%
Exceder	104	5%	99%
Atasco por otro tipo de ele	11	1%	100%
Equipo de mantenimiento	3	0%	100%
Total, de fallas	1934		

Nota. Cantidad de fallas de enero a abril de 2024 para diagrama de Pareto. Elaboración propia.

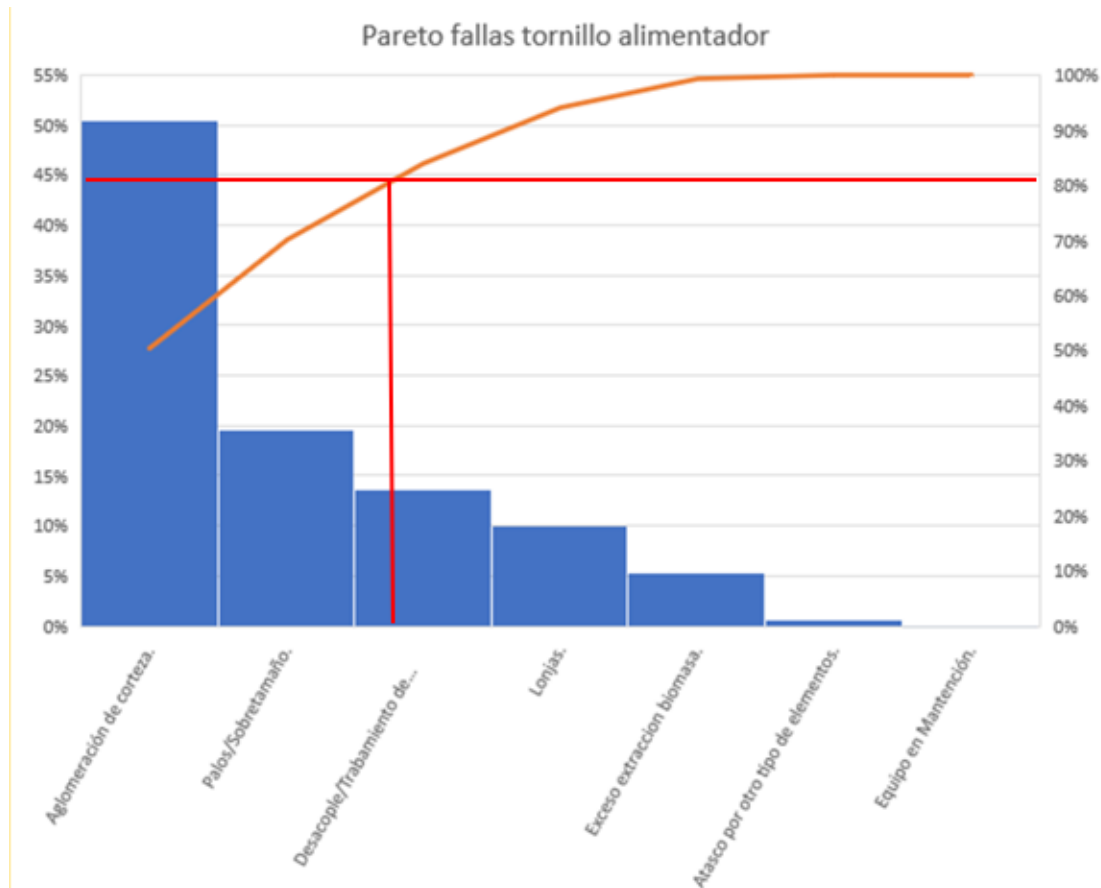


Gráfico 1-1: Gráfico de Pareto de fallas de tornillo.

Fuente: Datos de tabla elaboración propia

2.6.2. Humedad de la biomasa

La biomasa, especialmente cuando proviene de residuos forestales, suele contener un porcentaje significativo de humedad, por lo cual este impacta en el sistema:

Aumento de la fricción: La biomasa húmeda se adhiere a las superficies del tornillo y del silo, aumentando el desgaste por fricción.

Reducción de la eficiencia: La humedad dificulta el flujo del material y afecta el rendimiento de la caldera al disminuir su poder calorífico.



Figura 2-15: Humedad de biomasa combinado con lodo.

Fuente: Propia.

**CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE MEJORA EN LOS ROMPEDORES DE
BIOMASA**

3.1. INTRODUCCIÓN DE LA PROPUESTA

El sistema de alimentación actual de biomasa en la planta Línea 3 de Celulosa Arauco enfrenta desafíos operativos significativos debido al desgaste prematuro de los alabes del tornillo sin fin y rompedores de biomasa por su configuración y diseño, el cual no está cumpliendo con lo requerido actualmente por la planta. Estos problemas se deben a las características abrasivas de la biomasa que es utilizada, compuesta principalmente por biomasa de *Eucalyptus globulus* y otros materiales de difícil manejo como corteza de fibra dura y lodo mezclado, lo que pone una gran presión sobre los sistemas de alimentación. En la actualidad, el alabe del tornillo sin fin tiene un diseño del rompedor que no ha podido cumplir con lo requerido actualmente.

Esta propuesta aborda la mejora en los rompedores de biomasa del tornillo de alimentación de la caldera de poder, proponiendo cambios en el diseño del equipo para optimizar el proceso de transporte de biomasa. Esta mejora tiene como objetivo reducir el desgaste de los equipos, aumentar la eficiencia del sistema y disminuir los costos operativos asociados con las paradas no planificadas.

3.1.1. Objetivos de la propuesta de mejora

La propuesta de mejora tiene como objetivo mantener una alimentación constante a máxima capacidad de los rompedores de biomasa y los tornillos sin fin para mejorar y optimizar todos los desafíos operativos generados por la mala calidad de la biomasa. Los objetivos son los siguientes:

- Mejorar el diseño de los rompedores de biomasa para reducir la fricción y facilitar el transporte de biomasa, especialmente la biomasa de *Eucalyptus globulus*, que tiene fibras más largas y duras.
- Optimizar los tornillos sin fin mediante el uso de materiales de mayor resistencia al desgaste, como lo son Hardox 450 y acero inoxidable de alta resistencia; también se busca la implementación de mejoras en la geometría del tornillo.

- Implementar un sistema de mantenimiento predictivo para garantizar que los equipos se mantengan operativos durante más tiempo sin detenciones no planificadas.

3.1.2. Descripción y diseño de la propuesta de rompedores de biomasa

La propuesta de los rompedores de biomasa tiene un espesor de 25 mm con una altura de 100 mm y un ancho en su parte superior de 150 mm y en su parte inferior de 80 mm, con su forma trapezoidal, con un enfoque en la eficiencia de corte y resistencia al desgaste. Este tipo de geometría es considerada ideal para poder distribuir uniformemente las fuerzas durante el proceso de trabajo; se considera como una de las piezas clave en el sistema de alimentación de biomasa en la caldera de poder. Estos se encuentran en el mismo diseño de los alabes del tornillo sin fin mediante un proceso de soldadura, y su función principal, como su nombre lo indica, es romper la fibra de la biomasa, especialmente la biomasa de *Eucalyptus globulus*, que es conocida por sus largas fibras y su dureza. Esta propuesta de rompedores busca poder facilitar el transporte de biomasa a través del tornillo sin fin y hacia el hogar de la caldera de poder.



Figura 3-1: Diseño de la propuesta de rompedores de biomasa.

Fuente: Propia.

3.1.3. Material utilizado en los rompedores de biomasa

El material a utilizar en el nuevo diseño de los rompedores de biomasa es fundamental para mejorar su rendimiento. Actualmente, los rompedores de biomasa están fabricados de acero de alta resistencia. Sin embargo, debido a las condiciones de trabajo extremas (biomasa abrasiva, vibraciones constantes y humedad prolongada) se considera necesario utilizar materiales que puedan ofrecer una mayor resistencia al desgaste y a la fatiga, por lo tanto.

Se propone el uso del acero Hardox 450, que es un acero de alta resistencia al desgaste, que es capaz de soportar la abrasividad de la corteza como lo es la de Eucalyptus globulus.

Este tipo de acero aumentará la durabilidad de los rompedores de biomasa y reducirá la frecuencia de detenciones no programadas.

3.1.4. Función de los rompedores de biomasa

Los rompedores de biomasa tienen la función crucial de reducir el tamaño de la biomasa fibrosa para evitar que obstruya el flujo constante del material hacia la caldera. Para poder triturar la corteza y otras fibras largas, los rompedores permiten que la biomasa fluya de manera constante a través del tornillo sin fin, lo que reduce el riesgo de atascos y mejora el rendimiento del sistema. Sin embargo, debido a la dureza y abrasividad de la biomasa, los rompedores y los alabes del tornillo sin fin sufren un desgaste acelerado, lo que requiere una mejora en su diseño y materialidad para poder así prolongar su vida útil y confiabilidad de los equipos rotatorios.



Figura 3-1: Implementación de los rompedores.

Fuente: Propia.

3.1.5. Optimización de la implementación en el diseño del rompedor de biomasa

Para poder lograr la implementación del nuevo diseño y eficiencia de los rompedores de biomasa, se debe considerar una nueva configuración de los rompedores en los alabes del tornillo sin fin, esta nueva configuración se debe aplicar a través de un proceso de soldadura de alta resistencia, aplicada por personal altamente calificado.

Estos rompedores se deberán soldar por el lado posterior de ataque en el alabe, como se muestra a continuación.



Figura 3-2: Rompedor incorporado al albe del tornillo sin fin.

Fuente: Propia.

3.1.6. Implementación de la propuesta

El tornillo sin fin es uno de los principales mecanismos que transporta la biomasa hacia el hogar de la caldera de poder. La biomasa de *Eucalyptus globulus* tiene unas características que generan un desgaste acelerado en los tornillos sin fin debido a su alta abrasividad y la fibrosidad. Por lo tanto, la implementación de esta mejora propone mayor eficiencia del tornillo y menor cantidad de detenciones no programadas; el diseño del tornillo sin fin debe ser optimizado para manejar estos desafíos operativos.

A continuación, veremos algunas imágenes del proceso de mantenimiento de los rompedores, a través de las detenciones programadas implementadas, debido a los análisis anteriores.



Figura 3-3: Proceso de soldadura en terreno.

Fuente: Propia.



Figura 3-4: Montaje de rompedores al interior de silo.

Fuente: Propia.

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN ECONÓMICA

4.1. COSTO DE MANTENIMIENTO Y PRODUCCIÓN POR DETENCIONES NO PROGRAMADAS

Uno de los aspectos más significativos en el análisis económico es el cálculo de los costos asociados con las detenciones no planificadas antes de poder implementar la mejora de los rompedores de biomasa. A continuación, se muestra una cotización de la reparación completa del tornillo sin fin antes de poder implementar la nueva propuesta de mejora.

Tabla 2

Costo total de materiales para reparación de tornillo por detención.

Descripción De Materiales		Unidad	Cantidad	P/U Unidad	VALOR
Argon		M3	40	\$ 17.800	\$ 712.000
Mezcla Gas Para sistema Mig		M3	40	\$ 16.800	\$ 672.000
Oxigas (Oxigeno, Gas)		M3	20	\$ 7.500	\$ 150.000
Decapante y Pasivante y brochas		GL	1	\$ 42.000	\$ 42.000
Inox 200 en spray		c/u	3	\$ 14.500	\$ 43.500
Paños de Limpieza		KG	2	\$ 3.800	\$ 7.600
Gratas circular y escobillas de acero		c/u	3	\$ 13.800	\$ 41.400
Repuestos para equipo TIG (Tugsteno,Prensa,Filtro,Losa)		c/u	3	\$ 25.000	\$ 75.000
Repuestos para equipo MIG. (Tobera, Difusor,Bquillas)		c/u	4	\$ 16.800	\$ 67.200
Agua para Hidratacion Personal		gl	1	\$ 20.000	\$ 20.000
SUB TOTAL					\$ 1.830.700
Personal	PERSONAS	HH	Total HH	P/U Unidad	VALOR
Supervisor Calderero	1	90	90	\$ 13.230	\$ 1.190.700
Prevencionista	1	90	90	\$ 12.780	\$ 1.150.200
Mestro 1° Calderero	2	90	180	\$ 12.150	\$ 2.187.000
Soldador Mixto	2	90	180	\$ 14.580	\$ 2.624.400
Pañolero	1	36	36	\$ 9.180	\$ 330.480
SUB TOTAL					\$ 7.482.780
Equipos y Servicios		Unidad	Cantidad	P/U Unidad	VALOR
Traslados personal		GL	10	\$ 120.000	\$ 1.200.000
Traslados Flete (traslado de herramientas)		c/u	2	\$ 80.000	\$ 160.000
Almuerzo		c/u	64	\$ 9.200	\$ 588.800
Gastos Administrativos Logistico (Habilitacion de personal ,Administrativos,Confiability)		HH	576	\$ 750	\$ 432.000
Arriendo De Equipos y Herramientas		HM	576	\$ 650	\$ 374.400
EPP		c/u	4	\$ 75.000	\$ 300.000
SUB TOTAL					\$ 3.055.200

Nota. Planilla de planificación del área de mantenimiento.

Tabla 3*Costo total de reparación por detención.*

FORMULARIO OFICIAL PARA COTIZACIONES		
Descripción del Servicio y alcance Técnico		
Servicios de Soldaduras Generales en Taller de Calderería		
Notas: De acuerdo a requerimiento Cotización considera : 1. Turno de Lunes a Viernes en horario Normal de 8:00 a 17:00 hrs 2. Cotización considera 10 días hábiles desde el 15-04 al 26-04-24.		
Material:	\$ 1.977.156	OT:
Personal:	\$ 7.482.780	
Equipos y Servicios:	\$ 3.055.200	
Gastos Generales y Utilidades:	\$ 1.870.695	
VALOR TOTAL	\$ 14.385.831	

Nota. Planilla de planificación del área de mantenimiento.

4.1.1. Estimaciones de los costos por el impacto en las detenciones no programadas en la planta

Costo de consumo estimado de Fuel Oil 5

Cuando la caldera se detiene por fallas en la alimentación de biomasa, se utiliza Fuel Oil 5 como combustible alternativo.

Datos clave estimados:

Consumo por hora: 6 a 7 toneladas/hora.

Costo por tonelada: \$ 300.000 CLP.

Para un turno estimado de 12 horas:

Consumo mínimo: 6 tonelada/ hora $\times$ 12 = 72 toneladas.

Costo mínimo: 72 toneladas $\times$ 300,000 CLP/toneladas = 21,600,000 CLP.

Consumo máximo: 7 toneladas/ hora $\times$ 12 = 84 toneladas.

Costo máximo: 84 toneladas $\times$ 300,000 CLP/toneladas = 25,200,000 CLP.

Datos estimados por 24 horas

Costo mínimo: $144 \text{ toneladas} \times 300,000 \text{ CLP/toneladas} = 43,200,000 \text{ CLP}$.

Costo máximo: $168 \text{ toneladas} \times 300,000 \text{ CLP/toneladas} = 50,400,000 \text{ CLP}$.

1. Pérdida de producción estimada:

Las detenciones no planificadas interrumpen el proceso de alimentación de biomasa hacia la caldera, lo que a su vez impacta en la generación de energía y la producción de celulosa.

Un análisis de pérdida de producción puede estimar que, durante una parada de 8 horas, se pierden X toneladas de celulosa o una cantidad específica de energía generada, dependiendo de la capacidad de la planta.

Datos clave estimados:

- Capacidad de generación de la planta: X MW (por confirmar).
- Precio de venta de electricidad: \$ 80.000 CLP/MWh (ejemplo estándar).

Cálculo estimado:

- Energía no entregada por hora.
- Duración de la detención en horas.
- Pérdida económica: incógnita MWh $\times$ 80,000 peso chileno/MWh.

2. Costos estimados de intervención de mantenimiento:

Los costos laborales y los gastos asociados con las herramientas y materiales para realizar las reparaciones de los equipos dañados o desgastados durante las paradas.

En este caso, es común que se requiera la soldadura de los rompedores de corteza o el reemplazo de componentes dañados de los tornillos sin fin.

Componentes afectados:

- Tornillos sin alabes, rompedores de corteza, reductores, sensores.

Costos estimados asociados:

- Materiales: \$ 5.000.000 - \$ 10.000.000 CLP por intervención.
- Mano de obra: \$ 1.000.000 - \$ 2.000.000 CLP por jornada.
- Tiempo de detención adicional durante reparaciones: \$ 10.000.000 CLP por día.

Tabla 4

Costos estimados por detención de 12 horas.

Categoría	Costo estimado (CLP)
Consumo de Fuel Oil 5	\$21.600.000 - \$25.200.000
Pérdida de energía vendida	Depende de MW generados.
Reparación y mantenimiento	\$6.000.000 - \$12.000.000
Costos ambientales	\$5.760.000,00
Total, estimado	\$33.360.000

Nota. Valores estimados según área de producción.

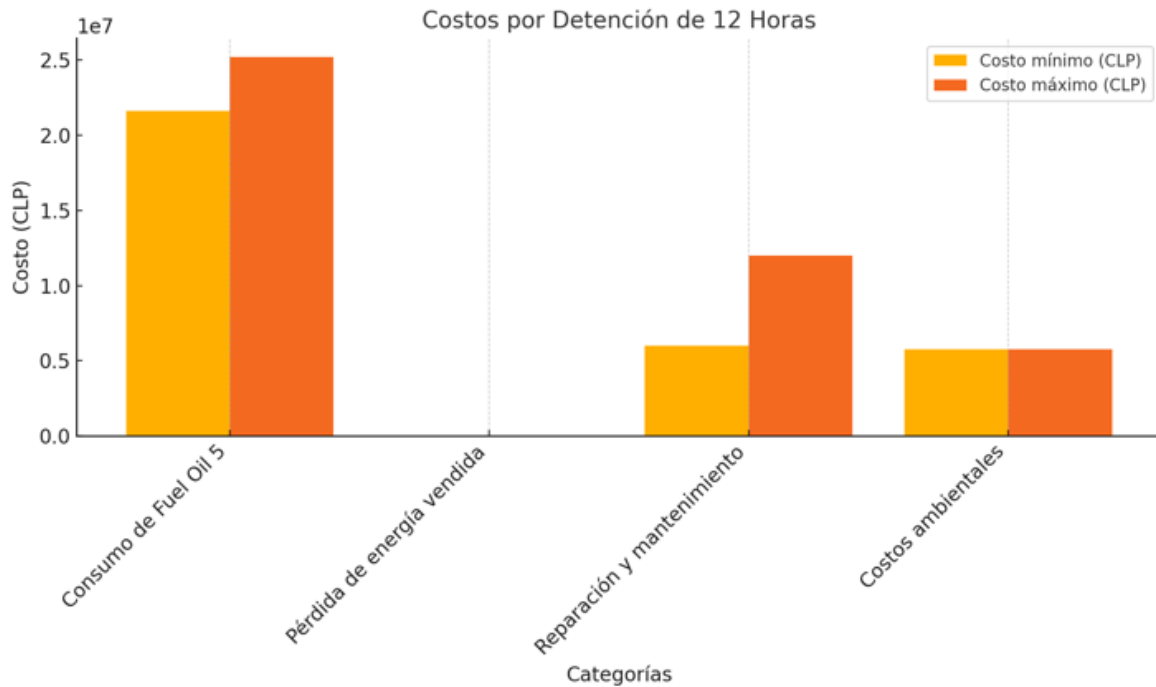


Gráfico 1-2: Costo estimado por 12 horas.

Fuente: Área producción línea 3.

4.2. BENEFICIOS ECONÓMICOS ESTIMADOS

Una vez implementadas las mejoras en el diseño de los rompedores de biomasa y los tornillos sin fin, se espera una disminución significativa de las detenciones no planificadas y una mayor eficiencia operativa. A continuación, se detallan los principales beneficios económicos que la propuesta traerá.

4.2.1. Reducción estimada de las detenciones no planificadas

Gracias a la mejora en los rompedores de biomasa y la implementación de materiales más resistentes, las paradas no planificadas disminuirán debido a que los equipos

experimentarán un menor desgaste. Las estimaciones indican que la frecuencia de paradas podría reducirse en un 60 y 70 % debido a los rompedores de biomasa optimizados.

4.2.2. Ahorros estimados en costos de mantención correctiva

El uso de materiales más resistentes y la mejora en el diseño de los equipos reducirán los costos de mantenimiento correctivo. Se estima que el costo de mantenimiento se reducirá en un 40 y 50% debido a la menor necesidad de reemplazo de piezas y la menor frecuencia de reparaciones.

Tabla 5

Costo estimado en mano de obra por detención programada.

02_DETALLE DEL PERSONAL					
LUNES A VIERNES DE 08:00HRS A 17:00HRS.	Cant.Pers.	H.H.	Total H.H.	Valor Unit.H.H.	Valor Total H.H.(\$)
Supervisor Mecánico	1	8	8	\$ 13.500	\$ 108.000
Soldador	2	8	16	\$ 13.000	\$ 208.000
Caldereros	2	8	16	\$ 12.500	\$ 200.000
Prevencionista	1	8	8	\$ 13.000	\$ 104.000
Subtotal dotación horario normal	6	32	48		\$ 620.000

Nota. Costos estimados de HH internas por detención programa

4.2.3. Productividad estimada

Al reducir las detenciones y mejorar el flujo de biomasa, la planta podrá operar a una mayor capacidad y con menores interrupciones, lo que llevará a un incremento de la producción de celulosa y de energía. Un aumento del 30-40% en la capacidad de producción es una estimación razonable, lo que se traduce en mayores ingresos por la venta de celulosa y energía.

4.2.4. Reducción de costos estimada por operaciones en general

Con la mejora en la eficiencia del sistema de alimentación de biomasa, se estima una reducción de los costos energéticos y otros costos operativos generales. Por ejemplo, la planta podría ahorrar hasta un 40% en costos energéticos asociados con la operación de la caldera.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo de titulación se enfocó en analizar y solucionar las problemáticas operativas del sistema de alimentación de biomasa en la caldera de poder de la Planta Celulosa Arauco Línea 3. Este sistema, crucial para la generación de energía de la planta, enfrenta desafíos significativos debido al desgaste acelerado de componentes clave, como los tornillos sin fin y los rompedores de biomasa. Estas fallas, provocadas principalmente por las propiedades abrasivas y heterogéneas de la biomasa de *Eucalyptus globulus* combinadas con lodo, generaban detenciones no programadas que afectaban negativamente la continuidad operativa, incrementaban los costos de mantenimiento y reducían la eficiencia energética del proceso.

A través de un análisis exhaustivo, se identifican las principales causas de estas fallas y sus repercusiones en el desempeño del sistema. Esto permitió diseñar un nuevo rompedor de biomasa, que permita cumplir con los estándares operacionales requeridos actualmente.

Además, la incorporación de tecnologías de monitoreo predictivo permitirá anticipar fallas antes de que se conviertan en problemas críticos, optimizando los recursos destinados al mantenimiento y garantizando un flujo constante de biomasa hacia la caldera. Esta combinación de mejoras técnicas y estrategias de mantenimiento representa una solución integral que aborda tanto los aspectos operativos como la eficiencia y confiabilidad de los equipos.

Desde una perspectiva económica, el análisis realizado demuestra que la implementación de estas mejoras es viable y altamente beneficiosa, con un retorno de inversión (ROI) positivo. La reducción de costos operativos asociados a las detenciones no programadas, la mejora en la productividad y la disminución del desgaste de los componentes se traducen en beneficios concretos para la planta. Asimismo, estas acciones contribuyen a los objetivos planteados en el proyecto.

Este trabajo no solo resuelve una problemática específica en la Planta Celulosa Arauco Línea 3, sino que también establece un marco metodológico replicable en otras instalaciones industriales con desafíos similares. La propuesta integra innovación, sostenibilidad y un enfoque técnico riguroso, demostrando cómo la ingeniería puede transformar desafíos operativos en oportunidades de mejora continua.

En conclusión, la implementación del diseño optimizado y las estrategias de mantenimiento predictivo propuestas en este estudio fortalecerán significativamente la operación de la caldera de poder. Esto se traducirá en una mayor continuidad operativa, menores costos de mantenimiento, un impacto ambiental positivo y una mejora sustancial en la productividad general de la planta. Este trabajo destaca la importancia de un enfoque integral en el mantenimiento industrial, donde la tecnología, la sostenibilidad y la gestión eficiente se combinan para garantizar procesos más robustos, eficientes y competitivos.

BIBLIOGRAFÍA

García, JM (2018). *Mantenimiento industrial: Fundamentos y aplicaciones*. Alf.

Domínguez, A. (2015). *Materiales resistentes al desgaste: Propiedades y aplicaciones*. Re

Ashby, MF (2017). *Diseño mecánico y selección de materiales*. Elsev.

López, JM (2016). *Manual de biomasa y bioenergía*.

SSAB. (2021). *Manual técnico del acero Hardox*.

Organización Internacional de Normalización (ISO). (2014). *ISO 55000: Gestión de activos*. ISO.

ASME. (Última edición). *Normas ASME para calderas y recipientes a presión*. ASME.

Fernández, C., et al. (2020). Evaluación del desgaste en tornillos sin fin utilizados en biomasa. *Revista de Ingeniería Mecánica*.

Rodríguez, L. (2019). Implementación de mantenimiento predictivo en equipos críticos. *Revista de mantenimiento y confiabilidad*.

Celulosa Arauco. (Última edición). *Manual operativo de la planta Celulosa Arauco Línea 3*. Celulosa Ara

Departamento de Mantenimiento, Celulosa Arauco Línea 3. (Últimos 5 años). *Reportes históricos de mantenimiento de la caldera de poder*. Ce

SSAB. (Dakota del Norte). *Portal técnico SSAB Hardox 450* www.ssab.com

