

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

**PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE TECNOLOGÍA DE ESCANEEO PARA EL CONTROL Y
MONITOREO DE INDICADORES CLAVES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CELULOSA**

Trabajo de Titulación para optar al Título de Ingeniero en
Mantenimiento Industrial

Alumno : Muñoz Benitez Maximiliano Osvaldo

Profesor : Larson Muñoz Guillermo Felipe

2025

DEDICATORIAS

Dedicado a mi hijo gaspar alonso y a mi familia, por su apoyo constante, paciencia y confianza a lo largo de todo este proceso académico. Su acompañamiento ha sido fundamental para alcanzar este logro.

AGRADECIMIENTOS

A dios, por brindarme la fortaleza, la constancia y la sabiduría necesarias para culminar este proceso académico, y por acompañarme en cada etapa de este camino.

A mi familia, por su apoyo constante, comprensión y confianza a lo largo de este proceso académico. Su acompañamiento fue fundamental para alcanzar este logro.

A los docentes de la carrera, por los conocimientos entregados, la orientación académica y el compromiso demostrado a lo largo de mi formación universitaria, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo abordar la problemática asociada a la falta de monitoreo continuo de variables críticas en el proceso de producción de celulosa, específicamente en el extremo húmedo del área de máquinas de la planta de Celulosa L3. Donde históricamente, el control del proceso se ha basado en mediciones manuales y muestreos puntuales, los cuales entregan información limitada y poco representativa de la variabilidad real del proceso, dificultando la detección temprana de desviaciones y la toma de decisiones oportunas.

En un contexto de producción continua, la ausencia de datos en tiempo real ha generado inestabilidad operacional, mayores tiempos de normalización frente a eventos no deseados y pérdidas asociadas a detenciones no programadas, como los cortes de hoja. Estas interrupciones impactan directamente a la eficiencia productiva, consumo de recursos y los costos operacionales, evidenciando la necesidad de incorporar herramientas tecnológicas que fortalezcan el control del proceso.

Frente a este escenario, el proyecto propone la implementación de un sistema de escaneo automatizado en línea, capaz de monitorear de manera continua variables críticas como humedad, gramaje y uniformidad de la hoja de celulosa. Esta solución busca mejorar la visibilidad del proceso, reducir la variabilidad operacional y apoyar una gestión basada en datos confiables, permitiendo pasar de un enfoque reactivo a uno preventivo.

El plan de esta tesis contempla el diagnóstico del estado actual del sistema de medición, la identificación de variables y puntos críticos del proceso, la selección y justificación técnica de la tecnología de escaneo, así como la evaluación de su impacto operativo y económico. De este modo, se busca demostrar que la incorporación de un sistema de monitoreo en línea no solo contribuye a la estabilidad del proceso, sino que también genera beneficios en términos de productividad, eficiencia y sostenibilidad de la operación.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	2
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. CAPITULO I MARCO TEÓRICO	3
1.1. SISTEMAS DE RECOPIACIÓN DE DATOS MEDIANTE UN SISTEMA AUTOMATIZADO	4
2.1.1. DEFINICIÓN SCANNER AUTOMATIZADOS	4
2.1.2. TÉCNOLOGÍAS DE SCANNER AUTOMATIZADOS	5
2.2. INDICADORES ASOCIADOS A LA PRODUCTIVIDAD	7
2.2.1. PRODUCTIVIDAD	7
2.2.2. EFICIENCIA	7
2.2.3. EFICACIA	7
2.2.4. DESEMPEÑO OPERACIONAL	7
2.2.5. CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN	8
2.2.6. UTILIZACIÓN	8
2.2.7. RENDIMIENTO DEL PROCESO	8
2.3. METODOLOGÍA	9
2.3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO	9
2.3.2. METODOLOGÍA MEJORA CONTINUA	9
2.4. HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS	10
2.5. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS	10
2.5.1. DIAGRAMA DE ISHIKAWA	10
2.5.2. ¿5 PORQUÉS?	11
2.5.3. OBJETIVOS SMART	11
2.5.4. ANÁLISIS CAUSA RAÍZ	11
2.5.5. DIAGRAMA DE PARETO	11
2.5.6. PLAN DE ACCIÓN OPERATIVO	12
2.6. BENEFICIOS DE PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ESCANEÓ	13
2.6.1. BENEFICIOS A NIVEL OPERATIVO	13
2.6.2. BENEFICIOS A NIVEL ECONÓMICO	13
3. CAPITULO II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
3.1. ANTECEDENTES GENERALES DE LA EMPRESA CELULOSA L3	15
3.1.1. PROCESO PRODUCTIVO GENERAL ÁREA DE MÁQUINAS	16
3.1.2. ETAPAS DE PRODUCCIÓN ÁREA DE MÁQUINAS	17
3.1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	20
3.1.4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE IMPLEMENTACIÓN DE SCANNER	20

3.2.	JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	21
3.2.1.	JUSTIFICACIÓN IMPORTANCIA TÉCNICA (PROCESO)	21
3.2.2.	JUSTIFICACIÓN IMPORTANCIA SOCIAL (TRABAJADORES).....	21
3.2.3.	JUSTIFICACIÓN IMPORTANCIA ECONÓMICA (EMPRESA)	21
3.3.	PROCESO PRODUCTIVO.....	22
3.3.1.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES CRITICAS DEL PROCESO	22
3.3.2.	INTERPRETACIÓN DE VARIABLES CRITICAS.....	22
3.3.3.	CONTROL Y SEGUIMIENTO DE VARIABLES	22
3.3.4.	EVALUACIÓN DE VARIABLES ESTUDIADAS.....	22
3.3.5.	MEJORA CONTINUA.....	23
3.4.	ANÁLISIS CAUSA RAIZ	23
3.4.1.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	23
3.4.2.	DESGLOSE DEL PROBLEMA.....	24
3.4.3.	OBJETIVO SMART	24
3.4.4.	DIAGRAMA ISHIKAWA	24
3.4.5.	IDENTIFICACION CAUSA-RAIZ (5 POQUÉS)	25
3.4.6.	PLAN DE ACCIÓN OPERATIVO	26
3.4.7.	RESULTADOS ESPERADOS	27
3.4.8.	ESTANDARIZACIÓN DE SOLUCIONES.....	28
3.4.9.	IMPACTO OPERATIVO DE LA SOLUCIÓN.....	29
4.	CAPITULO III DISEÑO DE SOLUCIÓN	30
4.1.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA	31
4.2.	DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL DEL PROCESO	32
4.2.1.	SITUACIÓN ACTUAL DE SISTEMAS DE MEDICIÓN.....	32
4.2.2.	LIMITACIONES DEL MÉTODO ACTUAL DE CONTROL Y MONITOREO	32
4.2.3.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES CRÍTICAS DEL PROCESO	33
4.3.	CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA SELECCIÓN DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN	
	33	
4.3.1.	CRITERIOS DE SEGURIDAD.....	33
4.3.2.	CRITERIOS DE PRODUCCIÓN	34
4.3.3.	CRITERIOS OPERACIONALES	34
4.3.4.	CRITERIOS MEDIO AMBIENTE.....	34
4.4.	SELECCIÓN DE TECNOLOGIA DE ESCaneo AUTOMATIZADO	36
4.4.2.	JUSTIFICACIÓN DE LA TECNOLOGIA SELECCIONADA	36
4.4.3.	SELECCIÓN DEL TIPO DE SCANNER Y SENSORES ASOCIADOS	37
4.5.	DISEÑO DE LA SOLUCION PROPUESTA.....	38
4.5.1.	UBICACIÓN DEL SCANNER EN EL PROCESO PRODUCTIVO	38
4.5.2.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN EN EL EXTREMO HÚMEDO..	39
4.5.3.	ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL	40

4.5.4.	INTEGRACIÓN DE SISTEMAS EXISTENTES (QCS/DCS)	41
4.6.	RECOPILACIÓN Y GESTIÓN DE DATOS	42
4.6.1.	VARIABLES MONITOREADAS EN LÍNEA	42
4.6.2.	FRECUENCIA Y FORMATO DE ADQUISICIÓN DE DATOS	43
4.6.3.	ALMACENAMIENTO Y VISUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA	44
4.7.	EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA SOLUCIÓN.....	44
4.7.1.	IMPACTO EN LA ESTABILIDAD DEL PROCESO	44
4.7.2.	IMPACTO EN LA PRODUCTIVIDAD Y EFICIENCIA OPERACIONAL	44
4.7.3.	IMPACTO EN LA REDUCCIÓN DE TIEMPOS PÉRDIDOS DE NORMALIZACIÓN	44
4.7.4.	IMPACTO EN SEGURIDAD Y CONDICIONES DE TRABAJO	45
4.8.	ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA SOLUCIÓN	45
4.8.1.	VIABILIDAD TÉCNICA	45
4.8.2.	VIABILIDAD ECONÓMICA.....	46
4.8.3.	VIABILIDAD OPERATIVA.....	46
5.	CAPITULO IV ESTUDIO ECONÓMICO	47
5.1.	OBJETIVO DEL ESTUDIO ECONÓMICO	48
5.2.	ALCANCE Y SUPUESTOS DEL ANÁLISIS	48
5.3.	IDENTIFICACIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN (capex)	49
5.4.	COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (opex).....	50
5.5.	IDENTIFICACIÓN DE BENEFICIOS ECONÓMICOS	50
5.6.	EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PROPUESTA.....	51
5.6.1.	AHORRO POR REDUCCIÓN DE DETENCIONES.....	51
5.6.2.	AHORRO POR DISMINUCIÓN DE REPROCESOS Y PRODUCTO FUERA DE ESPECIFICACIÓN	58
5.6.3.	AHORRO POR OPTIMIZACIÓN DEL USO DE RECURSOS.....	58
5.7.	ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA.....	59
5.8.	ANÁLISIS CUALITATIVO COSTO-BENEFICIO	59
5.9.	CONCLUSIONES DEL ESTUDIO ECONÓMICO	59
6.	CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	60
7.	BIBLIOGRAFIA / LINKCOGRAFIA	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	: <i>Principios claves Six Sigma</i>
Figura 2	: <i>Diagrama de Ishikawa</i>
Figura 3	: <i>Diagrama 5 porqués</i>
Figura 4	: <i>Planta General Celulosa Arauco</i>
Figura 5	: <i>Diagrama de procesos área de máquinas CELULOSA</i>
Figura 6	: <i>Fourdrinier mesa de formación área de máquina</i>
Figura 7	: <i>Sección prensas área de máquinas</i>
Figura 8	: <i>Máquina de secado área de máquinas</i>
Figura 9	: <i>Cortadora área de máquinas</i>
Figura 10	: <i>Líneas de embalaje área de máquinas</i>
Figura 11	: <i>Diagrama de Ishikawa MAPA L3</i>
Figura 12	: <i>Método actual de obtención de mediciones del proceso</i>
Figura 13	: <i>Principio de funcionamiento del scanner seleccionado</i>
Figura 14	: <i>Ubicación sistema de escaneo en proceso productivo celulosa área de máquinas</i>
Figura 15	: <i>Sistema de escaneo en operación normal de trabajo</i>
Figura 16	: <i>Diagrama de flujo sistema de monitoreo y control (Sensores-procesamiento-visualización-control)</i>
Figura 17	: <i>Diagrama Conceptual Integración del scanner con el QCS Y DCS</i>
Figura 18	: <i>Ejemplo perfil del producto recopilado en línea DNA</i>
Figura 19	: <i>Análisis de cortes de hojas en líneas de producción PM3 y PM4, periodo 2024. Fuente: MAPA L3</i>
Figura 20	: <i>Análisis de cortes de hojas en líneas de producción PM3 y PM4, periodo 2025. Fuente: MAPA L3</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	: <i>Plan de actividades, responsables y control de cumplimiento del plan de acción</i>
Tabla 2	: <i>Evaluación de comparativa de la situación actual del proceso y su impacto operacional</i>
Tabla 3	: <i>Variables críticas del proceso productivo y efectos de su desviación</i>
Tabla 4	: <i>Criterios de verificación del cumplimiento del plan de estandarización</i>
Tabla 5	: <i>Tecnologías de medición disponibles, variables medidas, ventajas y limitaciones</i>
Tabla 6	: <i>Especificaciones de los componentes del sistema de monitoreo</i>
Tabla 7	: <i>Variables monitoreadas por el sistema de escaneo y frecuencia de medición por variable</i>
Tabla 8	: <i>Comparativa operativa entre la situación actual y la implementación del scanner</i>
Tabla 9	: <i>Estimación de la inversión inicial para la implementación del sistema de escaneo IQ Valmet</i>
Tabla 10	: <i>Estimación costos operacionales anuales del sistema de escaneo</i>
Tabla 11	: <i>Causas y ubicaciones estudiadas de cortes de hojas en periodos 2024 y 2025 en PM3</i>
Tabla 12	: <i>Estimación del valor diario del costo de producción ADT</i>
Tabla 13	: <i>Estimación del valor diario del costo de venta ADT</i>
Tabla 14	: <i>Antecedentes de pérdidas de producción por cortes de hoja en PM3 año 2024.</i>
Tabla 15	: <i>Pérdidas económicas por detenciones no programadas en PM3 periodo 2024.</i>
Tabla 16	: <i>Antecedentes de pérdidas de producción por cortes de hoja en PM3 año 2025</i>
Tabla 17	: <i>Pérdidas económicas por detenciones no programadas en PM3 periodo 2025.</i>
Tabla 18	: <i>Beneficios económicos anuales estimados</i>
Tabla 19	: <i>Análisis viabilidad económica</i>

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

- °C : *Grados Celsius*
- % : *Porcentaje*
- g/m² : *Gramos de pulpa en un metro cuadrado*
- Seco Air dry (AD) : *Peso de pulpa secada al aire (10% de humedad)*
- Seco Bone dry (OD) : *Peso de pulpa completamente seca*
- ADt : *Tonelada de pulpa Air dry*
- Gramaje : *Densidad superficial de la hoja de celulosa*
- PM3 : *Pulp Machine 3*
- PM4 : *Pulp Machine*

INTRODUCCIÓN

En la industria de la celulosa la eficiencia operativa y la calidad del producto final dependen en gran medida de la capacidad de medir, controlar y monitorear con precisión los parámetros críticos del proceso productivo. Este sector industrial se caracteriza por un flujo continuo y altamente demandante en términos de control variables críticas como consistencias de la pulpa, la humedad, la temperatura entre otros factores que inciden directamente en la calidad de la celulosa como producto final. La falta de monitoreo oportuno y preciso de estos parámetros puede generar variaciones en la calidad, pérdidas de materia prima, ineficiencias energéticas y aumentos en los costos de producción.

Actualmente, en muchas plantas productoras de celulosa, las mediciones de los indicadores del proceso se realizan mediante procedimientos manuales o tecnologías convencionales que presentan limitaciones en cuanto a frecuencia de medición, precisión y capacidad de monitoreo en tiempo real. Estas limitaciones impiden una respuesta rápida ante desviaciones de los parámetros críticos, afectando en la estabilidad del proceso y la competitividad de la planta frente a las crecientes exigencias del mercado.

En este contexto, la incorporación de tecnologías de escaneo avanzadas surge como una alternativa innovadora para optimizar el control de procesos industriales. Dichas tecnologías permiten la obtención de datos precisos y continuos, facilitando la automatización del monitoreo, la detección temprana y la toma de decisiones basada en información en tiempo real. Su aplicación en el proceso de producción de celulosa podría representar un avance significativo en la gestión de la calidad, la eficiencia operativa y la sostenibilidad del proceso productivo.

La presente investigación tiene como propósito desarrollar una propuesta de implementación de tecnología de escaneo para el control y monitoreo de indicadores claves del proceso de producción de celulosa, orientada a mejorar la capacidad de control y la eficiencia global del sistema productivo. La relevancia de este proyecto radica en que contribuye a la modernización tecnológica del sector, promoviendo el uso de herramientas de la industria 4.0, fortaleciendo la competitividad de las empresas y favoreciendo una gestión más sustentable de los recursos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Proponer la implementación de un sistema de escaneo automatizado para el monitoreo y control de parámetros críticos en el proceso de producción de celulosa, orientado a mejorar la precisión y eficiencia mediante la obtención de datos en línea.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar parámetros claves del proceso de producción de celulosa que requieren medición constante y precisa del producto.
- Analizar las causas raíz que generan interrupciones, retrasos en normalización, aumentos innecesarios de recursos en el proceso.
- Evaluar las tecnologías de escaneo disponibles que sean viables para la implementación en el entorno industrial.
- Implementar una solución técnica que integre el sistema de escaneo con los sistemas existentes de monitoreo y control de la planta.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. SISTEMAS DE RECOPIACIÓN DE DATOS MEDIANTE UN SISTEMA AUTOMATIZADO

En la actualidad, la industria de la celulosa se enfrenta al desafío constante de mejorar la eficiencia, la calidad del producto y la sustentabilidad de sus procesos productivos. En este contexto, la incorporación de tecnologías de automatización y monitoreo en línea de ha convertido en un factor clave para lograr un control más preciso y confiable del proceso de fabricación.

El uso de sistemas de escaneo de medición en línea presenta una innovación tecnológica que permite obtener datos en tiempo real sobre variables críticas del proceso, tales como el gramaje, la humedad, la temperatura y uniformidad de la hoja (perfil) de la hoja de celulosa. Esta información resulta esencial para mantener la estabilidad operativa, optimizar el consumo de recursos y garantizar la calidad final del producto.

La implementación de esta tecnología en procesos continuos de producción de celulosa no solo contribuye a la mejora del control de indicadores claves de desempeño (KPIs), sino que también permite fortalecer la toma de decisiones basada en datos y avanzar hacia una gestión más eficiente e integrada de la planta.

En este marco teórico se abordarán los principios de funcionamiento del escáner de medición en línea, su relevancia dentro del proceso productivo de celulosa, así como los beneficios operativos y económicos asociados a su implementación. De este modo, se establecerán las bases conceptuales necesarias para sustentar la propuesta de incorporación de esta tecnología como una herramienta para el control y monitoreo eficiente del proceso productivo.

2.1.1. DEFINICIÓN SCANNER AUTOMATIZADOS

La tecnología de medición por escaneo en la industria de la celulosa constituye un pilar fundamental para el control de calidad y la eficiencia operativa. Mediante el uso de sensores no invasivos integrados a sistemas de control de calidad (QCS), es posible el monitoreo transversal y en tiempo real de variables críticas como el gramaje, la humedad y la temperatura.

Esta infraestructura tecnológica no solo permite la detección de desviaciones productivas, sino que facilita la toma de decisiones automatizada a través de la integración con sistemas de control distribuido (DCS), garantizando la estabilidad del proceso y la uniformidad del producto final bajo estándares de alta precisión.

2.1.2. TÉCNOLOGÍAS DE SCANNER AUTOMATIZADOS

Los sistemas de escaneo automatizado constituyen herramientas esenciales para la medición en línea de propiedades físicas dentro de los procesos industriales. Su capacidad para operar sin contacto, con alta velocidad y precisión, permite mantener el control continuo de variables críticas como el gramaje, la humedad, la temperatura y uniformidad de la hoja (perfil) de la hoja de celulosa. Entre las tecnologías más utilizadas destacan los sistemas basados en radiación NIR, pirómetros infrarrojos, espectrofotometría óptica y sensores de microondas, cada uno sustentado en principios físicos distintos que lo hacen adecuados para diferentes condiciones operativas. (fuente: Valmet)

2.1.2.1. TÉCNOLOGÍA INFRARROJO NIR

La tecnología de espectroscopia NIR se basa en la interacción de la radiación del rango cercano con los enlaces moleculares del material. Mediante el análisis de la absorción y reflexión espectral es posible estimar parámetros como humedad. Esta técnica destaca por su rápida respuesta, estabilidad y capacidad de integrarse a escáneres transversales que entregan perfiles completos del producto en el tiempo real.

Principio : Absorción de luz NIR por moléculas de agua en la hoja de celulosa.

Aplicación : Medición rápida de humedad sin contacto.

2.1.2.2. TÉCNOLOGÍA PIRÓMETRO IR

El pirómetro infrarrojo opera a partir de la detección de la radiación térmica emitida por la superficie de un cuerpo, permitiendo determinar su temperatura sin requerir contacto físico. Su uso resulta especialmente ventajoso en procesos de alta temperatura, materiales en movimiento o zonas de acceso limitado. La precisión y la rapidez de medición lo convierten en un instrumento clave para el control térmico en líneas de producción.

Principio : Medición de radiación térmica emitida por la hoja de celulosa.

Aplicación : Temperatura de la hoja en secadores, evitando contado directo y perturbación del flujo de producción.

2.1.2.3. TÉCNOLOGÍA ESPECTROFOTOMETRÍA ÓPTICA

La espectrofotometría óptica evalúa la respuesta del material frente a fuentes de luz en rangos visibles o ultravioleta. A partir del análisis espectral se obtienen parámetros como el color, brillo, reflectancia o variaciones superficiales relacionadas con la calidad del producto. Su integración en sistemas automatizados permite monitorear grandes superficies con buena resolución, asegurando uniformidad y detección temprana de desviaciones.

Principio : Luz incidente sobre la hoja y medición de la reflectancia para determinar blancura y uniformidad de color.

Aplicación : Control de calidad de la pulpa y del producto final.

2.1.2.4. MICRICROONDAS

La medición mediante microondas se fundamenta en la interacción de ondas electromagnéticas con la estructura interna del material, lo que permite estimar humedad, densidad y variaciones dieléctricas. Esta tecnología mantiene su precisión incluso bajo condiciones ambientales complejas, como la presencia de vapor, altas temperaturas o polución. Es especialmente útil en materiales de mayor espesor, donde otras técnicas pierden penetración o estabilidad.

Principio : Interacción de ondas electromagnéticas con el material, donde los cambios en la señal dependen de sus propiedades dieléctricas, especialmente el contenido de agua.

Aplicación : Medición en línea de humedad y densidad, incluso en materiales más espesos o con alta variabilidad interna.

2.2. INDICADORES ASOCIADOS A LA PRODUCTIVIDAD

La productividad de un proceso industrial depende de varios factores que permiten medir que tan bien se utilizan los recursos, como se desempeña la producción y en qué medida se cumplen los objetivos productivos. Para analizar esto de manera completa, es necesario considerar conceptos asociados a indicadores de medición de la productividad operacional. Estos elementos entregan una visión integral del funcionamiento de la planta y sirven como base para identificar oportunidades de mejora y evaluar el impacto de nuevas tecnologías o métodos de control.

2.2.1. PRODUCTIVIDAD

La productividad mide la eficiencia con que se utilizan los recursos (mano de obra, materiales, energía, capital) para producir bienes o servicios.

Se expresa generalmente como una relación entre la producción obtenida y los recursos empleados.

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Producción obtenida}}{\text{Recursos utilizados}}$$

2.2.2. EFICIENCIA

La eficiencia refleja el grado en que los recursos se utilizan adecuadamente para lograr los resultados esperados, sin desperdicio, ni trabajo.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Producción real}}{\text{Producción esperada}} \times 100$$

2.2.3. EFICACIA

La eficacia mide el grado de cumplimiento de los objetivos o metas planificadas, sin considerar los recursos usados. Donde una organización puede ser eficaz (logra la meta), pero con horas extras excesivas (ineficiente).

2.2.4. DESEMPEÑO OPERACIONAL

Conjunto de indicadores que miden el rendimiento global del proceso productivo, incluyendo eficiencia, calidad, tiempos y costos.

$$\text{OEE: DISPONIBILIDAD} \times \text{RENDIMIENTO} \times \text{CALIDAD}$$

El OEE dentro de un proceso de producción logra medir el porcentaje de tiempo productivo de una máquina o línea de producción.

2.2.5. CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN

La capacidad de producción se enfoca en la cantidad máxima de producción que puede obtenerse bajo condiciones normales de operación en un periodo determinado.

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{Producción total}}{\text{Tiempo disponible}}$$

2.2.6. UTILIZACIÓN

La utilización da a conocer el porcentaje de tiempo disponible en que un recurso esta efectivamente en uso. Esta evalúa el grado de aprovechamiento de la capacidad instalada.

$$\text{Utilización} = \frac{\text{Tiempo usado}}{\text{Tiempo disponible}} \times 100$$

2.2.7. RENDIMIENTO DEL PROCESO

Porcentaje de productos que cumplen las especificaciones respecto al total producido.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Unidades conformes}}{\text{Unidades totales}} \times 100$$

2.3. METODOLOGÍA

2.3.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

2.3.1.1. NIVEL DE PROFUNDIDAD PROPOSITIVO

El nivel de profundidad propositivo, denominado proyectivo o de investigación aplicada, va más allá de la descripción o explicación de un problema. Su objetivo es generar, diseñar o elaborar un producto, modelo, plan de intervención o una propuesta destinada a solucionar una situación problemática o satisfacer una necesidad específica previamente diagnóstica. (Barrantes, 2014 Palella y Martins, 2010 p. 102).

2.3.2. METODOLOGÍA MEJORA CONTINUA

2.3.2.1. SEIS SIGMAS

Six sigma método de mejora continua de procesos que ayuda a las organizaciones a perfeccionar sus procesos de negocio. El objetivo de Six sigma está enfocado en reducir lo más posible la cantidad de variaciones en un proceso a fin de evitar que el producto tenga defectos. Esta metodología, por lo general, se aplica para optimizar procesos de fabricación.

Figura 1

Principios claves Six Sigma Fuente: Flores, N, 2023



2.4. HERRAMIENTAS DE MEDICIÓN Y RECOLECCIÓN DE DATOS

- REPORTES O INFORMES BRINDADOS POR LA EMPRESA
- GRÁFICAS, HISTOGRAMAS, REPORTES GENERADOS EN EL SOFTWARE DE LA EMPRESA

2.5. HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

En el desarrollo de esta investigación se emplean diversas herramientas de análisis que permiten identificar, comprender y abordar de manera estructurada las causas de las interrupciones en el proceso de producción de celulosa. Estas herramientas aportan un enfoque complementario, desde la representación gráfica de factores hasta la formulación de objetivos y planes de acción sobre aquellas problemáticas que se van presentando.

2.5.1. DIAGRAMA DE ISHIKAWA

También conocido como diagrama espina de pescado o diagrama causa y efecto, es una herramienta utilizada para identificar las posibles causas de un problema concreto a estudiar. Su estructura se asemeja al esqueleto de un pez, con el "efecto" o "problema" representado en la cabeza. Su estructura se basa en seis categorías conocidas como las "6M" (Métodos, Mano de Obra, Maquinaria, Materiales, Medio Ambiente y Medición). Esta clasificación nos demuestra que el análisis de la causa raíz es un proceso esencial para identificar el verdadero origen de un problema. (Costa, I. (2025, Febrero 27)).

Figura 2

Diagrama Ishikawa, Fuente: Costa. I, (2025, 27 de febrero)

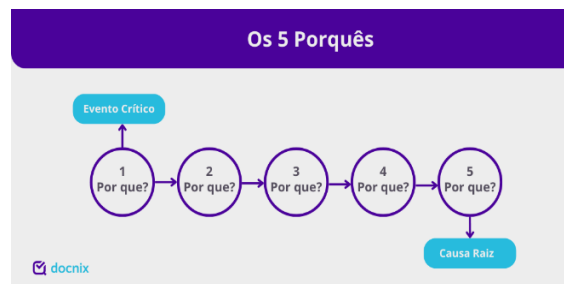


2.5.2. ¿5 PORQUÉS?

El análisis de los 5 porqués es una herramienta sencilla y directa para identificar la causa raíz de un problema. Su lógica consiste en cuestionar repetidamente “¿por qué ocurrió?” cada vez que aparece una causa aparente, avanzando paso a paso hasta llegar al origen real de la situación. Su simplicidad permite una exploración lógica y directa de las causas estructurales. Generalmente se utiliza como complemento del diagrama Ishikawa. Docnix, R. (2023, 21 de diciembre)

Figura 3

Diagrama 5 porqués Fuente Docnix, R. (2023, 21 de diciembre)



2.5.3. OBJETIVOS SMART

Los objetivos SMART son una metodología que nos permite formular metas claras y alcanzables, basada en cinco criterios: Específicos, Medibles, Alcanzables, Relevantes y con Tiempo definido. Esta herramienta permite establecer propósitos concretos que guían la planificación y evaluación de proyectos. Se utiliza para definir el objetivo central del análisis causa-raíz, asegurando que sea coherente con las necesidades operativas y viables en su implementación.

2.5.4. ANÁLISIS CAUSA RAÍZ

El análisis causa raíz (RCA, por sus siglas en inglés) es el proceso de descubrir las causas raíz de los problemas para identificar soluciones adecuadas. El RCA asume que es mucho más efectivo prevenir y resolver sistemáticamente los problemas subyacentes en lugar de solo tratar los síntomas.

2.5.5. DIAGRAMA DE PARETO

También conocido como la regla 80/20, es la piedra angular del diagrama de Pareto. Es un método gráfico que nos permite clasificar de forma ordenada datos de un proceso determinado y conocer aquellas variables o factores que tienen mayor impacto en el proceso. Está basada la regla del 80/20, también conocida como la ley de los “pocos vitales” y los “muchos triviales”. Según este concepto, si se tiene un problema con muchas causas, se puede decir que el 20% de las causas resuelven el 80% del problema.

2.5.6. PLAN DE ACCIÓN OPERATIVO

El plan de acción operativo es una herramienta de gestión que permite definir medidas concretas para abordar un problema identificado. Incluye elementos como la causa raíz, la acción correctiva, el plazo de ejecución y el responsable asignado. Su utilidad radica en traducir el análisis en intervenciones específicas, medibles y asignables.

2.6. BENEFICIOS DE PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ESCANEEO

2.6.1. BENEFICIOS A NIVEL OPERATIVO

- Mejora en la precisión de las mediciones, el sistema de escaneo automatizado proporciona datos más precisos y en tiempo real, mejorando la eficiencia y disponibilidad del proceso, así también mejorando el producto final y reduciendo variabilidad en el proceso de producción.
- Reducción de tiempo de inactividad, la automatización del proceso de medición permitirá una operación continua y sin interrupciones, reduciendo los tiempos de inactividad asociados con las mediciones manuales.
- Optimización de recursos al tener mediciones más precisas y frecuentes, reducir el desperdicio de materia prima y optimizar el uso de energías en el proceso mediante equipos que solo se encuentran en servicio en operación normal.
- Mejora en la toma de decisiones basada en datos, la información en tiempo real evita decisiones reactivas o basadas en estimaciones, lo que reduce el riesgo de acciones incorrectas que puedan generar interrupciones en el proceso.
-

2.6.2. BENEFICIOS A NIVEL ECONÓMICO

- Reducción de pérdidas de producción por interrupciones del proceso, al detectar desviaciones prematuras, el proceso disminuye la frecuencia y duración de paradas no programadas, reduciendo las horas no productivas y los costos asociados a la normalización del proceso.
- Menor variabilidad y menor generaciones de productos fuera de especificaciones estandarizadas, la medición continua permite mantener parámetros claves dentro de los rangos establecidos.
- Aumento de la productividad del proceso, permite una operación más estable elevando el rendimiento de la línea de producción.

CAPITULO II
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. ANTECEDENTES GENERALES DE LA EMPRESA CELULOSA L3

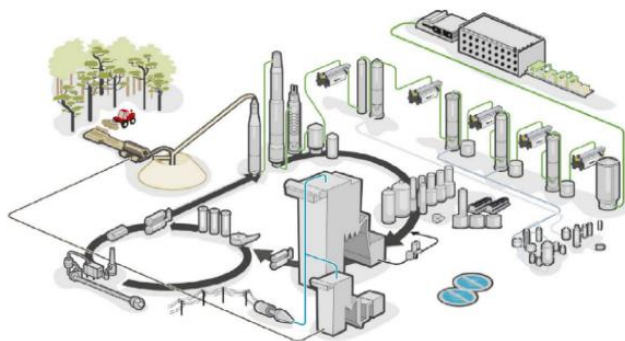
El Proyecto MAPA (Modernización y Ampliación de Planta Arauco) representa una de las iniciativas industriales más importantes de la historia reciente de Chile y un hito para la industria forestal nacional. Desarrollado por Celulosa Arauco y Constitución S.A. (ARAUCO), este proyecto tuvo como objetivo modernizar las instalaciones existentes en el complejo industrial de Horcones, ubicado en la comuna de Arauco, Región del Biobío, e incorporar una nueva línea de producción de celulosa Kraft blanqueada de eucalipto, conocida como MAPA Línea 3.

Con una inversión superior a los 2.300 millones de dólares, MAPA buscó no solo aumentar la capacidad de producción de celulosa, sino también elevar los estándares ambientales, tecnológicos y de eficiencia energética de la planta. La implementación de tecnologías de última generación ha permitido optimizar los procesos productivos, reducir emisiones, mejorar el tratamiento de efluentes y aprovechar la biomasa para la generación de energía limpia.

Más allá de su relevancia económica, el Proyecto MAPA ha significado un importante impulso al desarrollo local, generando miles de empleos directos e indirectos y fortaleciendo la cadena de valor del sector forestal en la zona del Biobío. Su puesta en marcha consolida a ARAUCO como un referente global en innovación y sostenibilidad dentro de la industria de la celulosa y los bioproductos. (Boletín MAPA L3, 2019)

Figura 4

Planta General Celulosa Arauco, Fuente: L3 MAPA



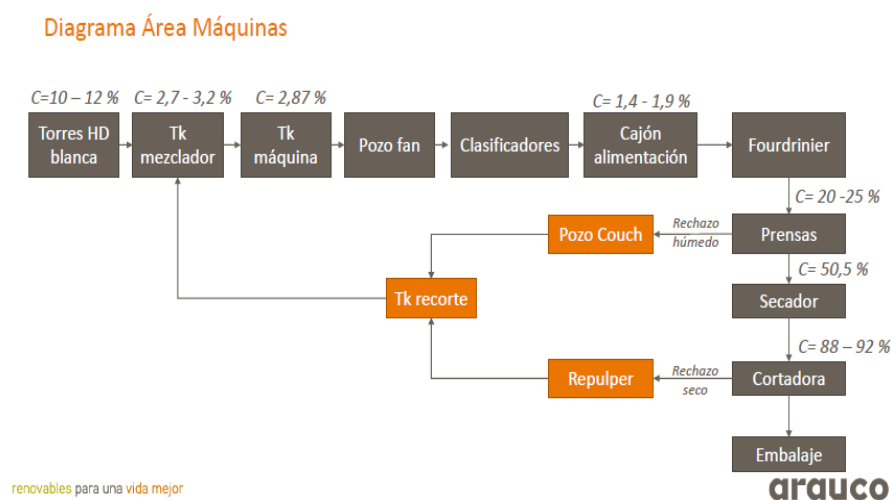
3.1.1. PROCESO PRODUCTIVO GENERAL ÁREA DE MÁQUINAS

El área de máquinas constituye una de las etapas más relevantes dentro del proceso productivo de la celulosa, en ella se lleva a cabo una serie de fases que culminan en un producto final, donde empieza con la etapa de preparación pasta, para luego pasar la etapa de la formación, prensado, secado, dimensionado y para culminar las fases principales termina con el embalaje del producto. Esta zona es el punto donde la pulpa, previamente blanqueada, se transforma en una hoja continua de celulosa, lista para su almacenamiento y posterior a ello envíos a diferentes lugares para su proceso de conversión.

Este proceso opera de manera continua, automatizada y bajo condiciones de alta exigencia de control, debido a que pequeñas variaciones de parámetros de operación pueden generar defectos en la hoja, pérdidas de material o ineficiencias energéticas. Por lo tanto, la precisión en la medición de variables críticas como la humedad, el gramaje, la temperatura, la consistencia y la uniformidad del gramaje a la salida del cajón cabeza es esencial para garantizar la calidad del producto final.

Figura 5

Diagrama de procesos área de máquinas CELULOSA. Fuente: L3 MAPA



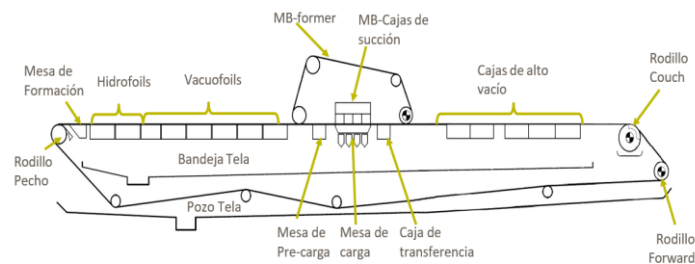
3.1.2. ETAPAS DE PRODUCCIÓN ÁREA DE MÁQUINAS

3.1.2.1. FORMACIÓN DE LA HOJA DE CELULOSA

En la sección tela (Fourdrinier) comienza el proceso de formación, donde la distribución de la pulpa de celulosa es suministrada por el cajón de cabeza (head box), el cual se encarga de suministrar un flujo de pulpa fibrosa sobre la tela de formación de característica plana y drenable donde se mantiene en movimiento. Esta etapa busca lograr una distribución homogénea de fibras para formar una hoja de celulosa uniforme y con cualidades competentes. Parte del agua contenida en la pulpa es eliminada mediante un drenaje gravitacional y posterior a ello mediante un sistema de vacío, lo que permite consolidar la estructura inicial de la hoja de celulosa. (Fuente: Valmet).

Figura 6

Fourdrinier mesa de formación área de máquinas. Fuente: L3 MAPA

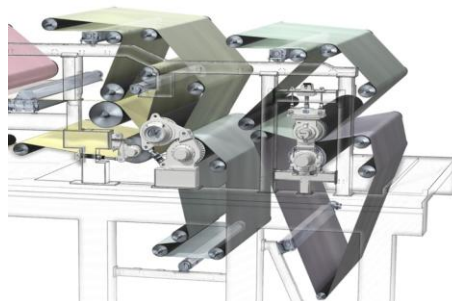


3.1.2.2. SECCIÓN PRENSAS

La hoja húmeda y formada en la fase anterior avanza a la sección prensas, donde esta se introduce en un proceso de rodillos recubiertos por filtros absorbentes. En este proceso se aplica una presión mecánica controlada con el objetivo de reducir el porcentaje de agua que lleva la hoja de celulosa, donde el porcentaje de humedad inicia en un 80 % y termina en un 50 % de humedad, por ende, como resultado mejora la densidad, la uniformidad y la resistencia de la hoja de celulosa antes de entrar a la siguiente fase de secado.

Figura 7

Sección prensas área de máquinas. Fuente: Valmet

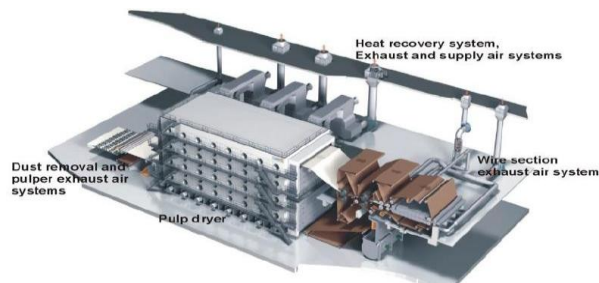


3.1.2.3. SECCIÓN DE SECADO

La hoja ingresa a la sección de secado, el secador tiene como finalidad extraer el agua remanente de la hoja de celulosa, que ya no puede ser extraída de forma mecánica en la etapa de prensado. La humedad se evapora por medio de aire caliente seco y se expulsa hacia la atmósfera. La hoja de pulpa entra con un seco de 50 a 55% y sale del secador aproximadamente con un 90% de seco (%BD).

Figura 8

Máquina de secado área de máquinas. Fuente: Valmet

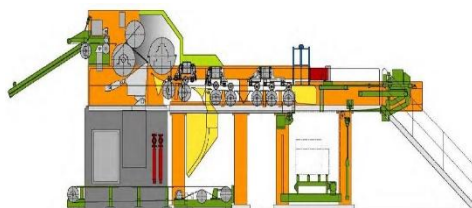


3.1.2.4. CORTADORA

Luego de obtener una hoja de celulosa con el porcentaje de humedad requerido por los estándares de calidad, se somete al proceso de dimensionado del producto final, donde la hoja se somete al conjunto de la cortadora para realizar un corte longitudinal y así también realizar un corte de manera transversal, obteniendo como resultado el dimensionado de las hojas de celulosa, para su posterior embalado.

Figura 9

Cortadora área de máquinas. Fuente: L3 MAPA

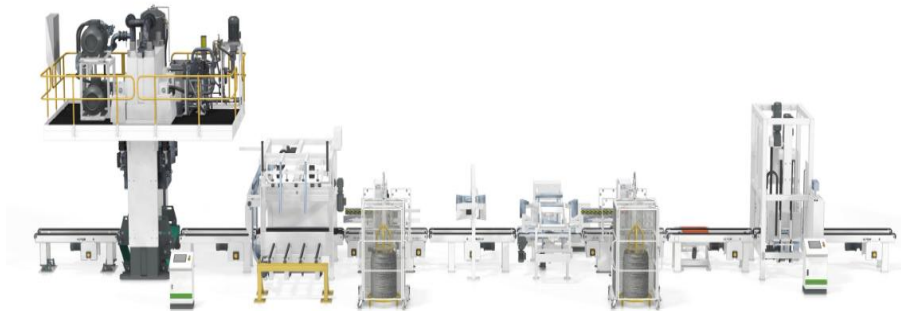


3.1.2.5. LÍNEAS DE EMBALAJE

Dado el formato requerido de la hoja de celulosa en la fase anterior, se procesa a la fase final del proceso de conversión de producción de celulosa, donde las hojas de celulosa pasan por una serie de pasos antes de terminar su proceso, entre ellos se enfocan en el pesaje de los fardos, prensado, envoltura, plegado de tapas, amarrado para luego darle una identificación propia, luego de esto ya se encuentra finalizado el proceso de embalaje para ser derivado a las bodegas de almacenamiento y su posterior distribución del producto.

Figura 10

Líneas de embalaje área de máquinas. Fuente: L3 MAPA



3.1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la industria de la celulosa, la medición precisa y continua de parámetros claves durante el proceso de producción es esencial para garantizar la calidad del producto final y optimizar la eficiencia del proceso. Actualmente, muchas de las mediciones se realizan de manera manual o con tecnologías tradicionales que no permiten un monitoreo en tiempo real ni una precisión óptima. Esto puede derivar en una variabilidad en la calidad del producto, pérdidas de materia prima, ineficiencia operativa y aumento de los costos. El desafío radica en la implementación de una herramienta tecnológica avanzada que permita realizar mediciones precisas, con alta frecuencia y sin interrumpir el flujo productivo.

El proceso de producción de celulosa es una de las etapas más complejas y críticas dentro de la industria de celulosa, y la eficiencia en este proceso tiene un impacto directo sobre la calidad del producto final, así como sobre los costos operativos de la planta. A pesar de los avances tecnológicos, muchos de los procesos en la fabricación de celulosa aún dependen de mediciones manuales o de sistemas tradicionales que no permiten un monitoreo en tiempo real, ni garantizan la precisión deseada para optimizar cada fase de la producción. Esta falta de precisión y automatización genera una serie de problemas operacionales que afectan tanto la calidad del producto como la eficiencia en el uso de recursos.

3.1.4. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE IMPLEMENTACIÓN DE SCANNER

El proyecto consiste en la incorporación de un scanner automatizado en línea en el extremo húmedo del proceso productivo de la planta de celulosa L3, con el objetivo de mejorar la calidad del monitoreo y reducir las interrupciones operacionales.

Históricamente, la toma de muestras en la industria se realizaba de forma manual, con mediciones puntuales y dependientes de la disponibilidad del personal, lo que entregaba información limitada y poco representativa de la variabilidad real del proceso. En la actualidad, los sistemas de medición en línea permiten obtener datos continuos y precisos, facilitando un control más estable y oportuno de los parámetros críticos.

La necesidad de este proyecto surge tras la reciente puesta en marcha de mejoras en el área de máquinas, donde persisten problemáticas asociadas a la falta de datos en tiempo real, la incapacidad de anticipar desviaciones y las frecuentes interrupciones del proceso. Una detención típica requiere alrededor de 6 horas de normalización, generando pérdidas de eficiencia, sobreconsumo de recursos y desalineaciones operativas. La instalación del scanner busca enfrentar directamente estas brechas, proporcionando información inmediata sobre variables clave del extremo húmedo, lo que permitirá tomar decisiones más rápidas, estabilizar el proceso y disminuir el impacto económico derivado de la inestabilidad productiva. De este modo, el proyecto se orienta a fortalecer el control operacional mediante tecnología moderna y acorde a las demandas actuales de la producción continua

3.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

3.2.1. JUSTIFICACIÓN IMPORTANCIA TÉCNICA (PROCESO)

La implementación de una tecnología de escaneo para el control y monitoreo de indicadores claves en el proceso de producción de celulosa representa un avance significativo en términos de precisión, automatización y confiabilidad operativa. Actualmente, muchas de las mediciones críticas como gramaje, humedad, temperatura y otros parámetros de calidad se realizan de forma puntual o con equipos que no garantizan una lectura continua y en tiempo real, lo que dificulta la detección temprana de desviaciones.

La tecnología de escaneo permite obtener datos continuos y de alta resolución a lo largo de todo el ancho de la hoja de celulosa, proporcionando una caracterización técnica más completa del proceso. Esto permite mejorar la estabilidad operacional, reducir la variabilidad de los parámetros clave y fortalecer el control de calidad. En consecuencia, la propuesta contribuye directamente al desarrollo técnico del proceso, integrando herramientas de medición modernas y un enfoque basado en datos.

3.2.2. JUSTIFICACIÓN IMPORTANCIA SOCIAL (TRABAJADORES)

La propuesta también posee una relevancia social al generar mejoras en las condiciones de trabajo y en el impacto medioambiental asociado al proceso productivo. Una mayor automatización del monitoreo disminuye la exposición de los trabajadores a tareas repetitivas, exigentes o potencialmente riesgosas, fortaleciendo la seguridad laboral.

Por otro lado, un control más preciso de los parámetros críticos del proceso permite operar de manera más eficiente y sustentable, reduciendo desperdicios, consumo energético, consumo de agua y el uso excesivo de químicos. Esto se alinea con las crecientes demandas de responsabilidad ambiental en la industria, contribuyendo positivamente a la comunidad y promoviendo prácticas industriales más limpias y sostenibles.

3.2.3. JUSTIFICACIÓN IMPORTANCIA ECONÓMICA (EMPRESA)

Desde la perspectiva económica, la adopción de tecnologías de escaneo en la producción de celulosa genera impactos directos en la eficiencia y competitividad del proceso. Al disponer de información precisa y en tiempo real, es posible reducir rechazos, reprocesos y pérdidas por variabilidad de calidad, lo que se traduce en ahorros significativos en insumos, energía y mano de obra.

Asimismo, la reducción de paradas no programadas y la optimización del control operativo disminuyen los costos asociados a fallas o desviaciones no detectadas a tiempo. La inversión inicial en tecnología se justifica ampliamente debido al incremento de la productividad, la mejora del rendimiento y los menores costos operativos a mediano y largo plazo. Esta iniciativa, por lo tanto, fortalece la rentabilidad del proceso y contribuye al uso eficiente de los recursos productivos.

3.3. PROCESO PRODUCTIVO

El proceso productivo de la celulosa corresponde al conjunto de operaciones industriales destinadas a transformar la madera en pulpa celulosa, mediante etapas de preparación, cocción, lavado y clasificación. Este proceso es continuo el cual requiere un monitoreo y control riguroso de variables operacionales para asegurar la calidad del producto y la eficiencia productiva.

3.3.1. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES CRÍTICAS DEL PROCESO

La identificación de variables críticas permite determinar los parámetros que influyen directamente en la estabilidad del proceso y en la calidad de la pulpa. Definiendo que entre estas variables a trabajar destacan la humedad, el gramaje, la temperatura y la uniformidad de la hoja (perfil), las cuales requieren un monitoreo constante para evitar desviaciones operacionales.

3.3.2. INTERPRETACIÓN DE VARIABLES CRÍTICAS

La interpretación de las variables consiste en analizar su comportamiento y variabilidad dentro del proceso productivo, con el fin de identificar tendencias y desviaciones que puedan afectar el desempeño del sistema. Una correcta interpretación facilita la detección temprana de problemas operacionales.

3.3.3. CONTROL Y SEGUIMIENTO DE VARIABLES

El control y seguimiento de variables críticas una vez de haber realizado la interpretación de variables, se debe orientar a mantener los parámetros del proceso dentro de los rangos establecidos. La disponibilidad de mediciones en línea permite realizar ajustes oportunos, reducir la variabilidad y mejorar la continuidad operacional.

3.3.4. EVALUACIÓN DE VARIABLES ESTUDIADAS

En la evaluación de variables críticas nos enfocamos en la comparación de los valores obtenidos con estándares técnicos y objetivos productivos. En este análisis podemos identificar las brechas de desempeño y respaldar la toma de decisiones orientadas a la optimización del proceso.

3.3.5. MEJORA CONTINUA

Finalmente, el proceso de mejora continua busca optimizar el proceso productivo mediante el análisis sistemático de las variables críticas y la implementación de acciones de corrección. El uso de la información confiable contribuye a aumentar la eficiencia, reducir pérdidas y asegurar la calidad el producto final.

3.4. ANÁLISIS CAUSA RAIZ

El análisis causa-raíz es una metodología enfocada en identificar las causas fundamentales de un problema, más allá de sus síntomas superficiales. Su propósito se centra en comprender en por qué ocurre una falla o desviación, donde cuya finalidad es aplicar soluciones efectivas y sostenibles que eviten su recurrencia.

En el ámbito de problemas que se puedan presentar en procesos de producción industriales, el RCA permite investigar fallos, errores, donde tiene como resultado descubrir la causa principal (la raíz) que lo provoco, permitiendo implementar acciones correctivas que eviten que vuelvan a suceder.

3.4.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El proceso productivo del área de máquinas de la empresa Celulosa Arauco L3 presenta una falta de lecturas de variables críticas en línea en el extremo húmedo de su proceso de celulosa. Esta situación ha conllevado a una serie de interrupciones en el proceso, esta ha originado una alerta hacia el rol supervisor debido a las múltiples interrupciones ocasionadas, donde los indicadores de desempeño productivo se han visto perjudicados debido a las pérdidas de producción constantes.

- ¿Qué? : Falta de lecturas de variables críticas del proceso en línea.
- ¿Dónde? : Extremo húmedo del área de máquinas próximo a la entrada a la máquina de secado.
- ¿Cuándo? : Identificado dentro de los periodos de operación 2024-2025 en la máquina de producción PM3.
- ¿Cuánto? : Se estima que dentro del periodo mencionado anteriormente el 21.01 % de los cortes de hoja han sido por causales basadas en no tener control sobre las variables críticas.
- Indicador : % de interrupciones en el proceso debido a las variables estudiadas de la mano de sus correspondientes zonas de interrupción del corte.

3.4.2. DESGLOSE DEL PROBLEMA

El proceso productivo del área de máquinas involucra una serie de variables que deben ser atendidas de manera preventiva, dentro de estas variables, existen varias que son de carácter críticas, es por ello por lo que actualmente existen métodos de recopilación de datos que no permiten anticiparse de manera preventiva a futuras interrupciones del proceso de producción de celulosa, lo que dificulta un seguimiento continuo de estas variables críticas.

3.4.3. OBJETIVO SMART

Evaluar la implementación de tecnología de escaneo automatizado para el control y monitoreo en línea de variables críticas del proceso de producción de celulosa, con el fin de reducir la variabilidad del proceso y mejorar la estabilidad operacional, mediante el análisis de datos en tiempo real, donde se busca disminuir o eliminar aquellas interrupciones asociadas a formación/daño de hoja, variación y error operacionales.

Formula: $\text{Número total de interrupciones} / 100 * \text{número de interrupciones asociadas a las variables de interés.}$

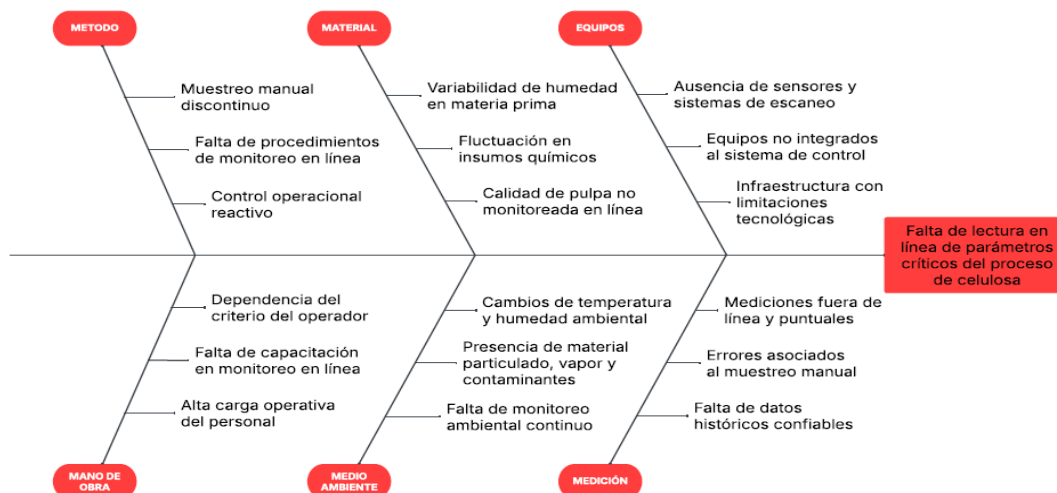
Como producto de cuya formula obtendremos el porcentaje de aquellas interrupciones no deseadas en el proceso.

3.4.4. DIAGRAMA ISHIKAWA

Con el fin de identificar las principales causas que originan la falta de lectura en línea de parámetros críticos del proceso de producción de celulosa, se utiliza el diagrama de Ishikawa como herramienta de análisis causa-efecto. Esta metodología permite organizar y visualizar de manera sistemática los factores que influyen en el problema, facilitando su comprensión y posterior abordaje.

Figura 11

Diagrama de causa y efecto (Ishikawa) asociada a la falta de lectura en línea de parámetros críticos del proceso de producción de celulosa MAPA L3 Fuente: Elaboración Propia



El análisis del diagrama Ishikawa evidencia que la falta de lectura en línea de parámetros críticos del proceso de producción de celulosa se origina principalmente en deficiencias asociadas a los métodos de control, la mano de obra y la infraestructura tecnológica disponible. La dependencia de muestreos manuales y mediciones discontinuas, junto con la ausencia de procedimientos estandarizados para el monitoreo continuo, favorece un enfoque reactivo del control operacional. A esto se suma la alta dependencia del criterio del operador y la falta de capacitación específica en tecnologías de medición en línea, lo que limita la capacidad de detectar y corregir oportunamente las desviaciones del proceso.

Por otra parte, los ámbitos de maquinaria, materiales medio ambiente y medición refuerzan la problemática identificada, al evidenciar una limitada incorporación de sistemas de medición en línea, escasa integración con los sistemas de control y una insuficiente disponibilidad de datos confiables y representativos. La variabilidad de la materia prima, las fluctuaciones de los insumos químicos y las condiciones ambientales no son controladas en tiempo real, lo que impacta negativamente en la estabilidad del proceso y la calidad del producto final

Estos factores justifican la necesidad de implementar tecnología de escaneo que permita mejorar el control, monitoreo y gestión del proceso productivo de celulosa.

3.4.5. IDENTIFICACION CAUSA-RAIZ (5 POQUÉS)

Como complemento al análisis estructurado del problema, se aplica la técnica de los 5 porqués con la finalidad de profundizar en una de las causas críticas identificada en el diagrama de Ishikawa. Esta herramienta permite explorar secuencial el origen de una situación no deseada, revelando la causa raíz que la sustenta. En el marco de esta tesis, su aplicación contribuye a comprender porque persiste la falta de implementación de sistemas de monitoreo en línea de procesos con variables críticas que se deben monitorear de manera constante.

- ¿Por qué el proceso productivo no cuenta con sistemas de medición en línea instalados en puntos críticos?

Porque el proceso productivo no cuenta con sistemas de medición en línea porque históricamente no se han incorporado tecnologías de monitoreo continuo en los puntos críticos del proceso.

- ¿Por qué el control del proceso se basa principalmente en muestreos manuales y mediciones fuera de línea?

Porque el control del proceso se basa principalmente en muestras manuales.

- ¿Por qué históricamente el proceso ha operado bajo prácticas tradicionales de control, sin incorporar tecnologías de monitoreo continuo?

Porque las prácticas tradicionales de control se han mantenido en el tiempo.

- ¿Por qué no se ha realizado una evaluación técnica que justifique la implementación de tecnologías de medición en línea orientadas al control de variables críticas?

Porque no se ha evidenciado una evaluación técnica integral de medición de datos en línea que permita cuantificar los beneficios operacionales y productivos asociados a la implementación de sistemas de medición en línea.

- ¿Por qué no se dispone de información continua y confiable que evidencie el impacto de la variabilidad del proceso en la eficiencia productiva y en la calidad del producto final?

Porque la falta de información continua y confiable ha limitado la generación de datos históricos representativos, dificultando la toma de decisiones basada en evidencia y la justificación de mejoras tecnológicas.

3.4.5.1. CAUSA-RAÍZ IDENTIFICADA:

“La causa raíz del problema corresponde a la inexistencia de un sistema de monitoreo continuo que genere información confiable para la toma de decisiones, lo que ha impedido la evaluación técnica y la implementación de tecnologías de medición en línea en el proceso productivo”

3.4.6. PLAN DE ACCIÓN OPERATIVO

Problema central estudiado : Falta de lectura en línea de parámetros críticos del proceso de producción de celulosa.

Causa raíz identificada : Inexistencia de un sistema de monitoreo continuo que genere información confiable en línea para la toma de decisiones oportunas.

Tabla 1

Plan de actividades, responsables y control de cumplimiento del plan de acción.

Actividad	Responsable	Plazo estimado	Indicador de cumplimiento
Identificación de puntos críticos de medición en el proceso	Ingeniero de procesos / Área de operaciones	Corto plazo	Puntos críticos definidos y documentados
Definición de variables críticas a monitorear	Ingeniero de procesos / Área de calidad	Corto plazo	Lista de variables críticas validada
Selección de tecnología de escaneo adecuada	Área de ingeniería / Mantenimiento	Mediano plazo	Tecnología seleccionada según criterios técnicos
Integración del sistema de monitoreo con el control del proceso	Área de automatización / TI industrial	Mediano plazo	Sistema integrado y datos disponibles en línea

Capacitación del personal operativo y de supervisión	Jefatura de operaciones / Recursos Humanos	Mediano plazo	Personal capacitado y evaluado
Seguimiento y evaluación del desempeño del sistema	Ingeniero de procesos	Largo plazo	Reducción de la variabilidad de variables críticas
Consolidación del sistema para mejora continua	Área de operaciones / Mejora continua	Largo plazo	Uso sistemático de datos para análisis y mejora

Nota: La tabla presenta las principales actividades definidas para la estandarización de soluciones, considerando responsables, plazos e indicadores de cumplimiento, conforme a los lineamientos de gestión de calidad y mejora continua.

3.4.7. RESULTADOS ESPERADOS

- Identificación clara de los puntos críticos del proceso de producción de celulosa donde la lectura en línea de parámetros resulta relevante.
- Definición y priorización de las variables críticas del proceso a monitorear en línea, alineadas con los objetivos de control y estabilidad operacional.
- Implementación de un sistema de monitoreo continuo mediante tecnología de escaneo que permita obtener datos confiables y en tiempo real.
- Integración efectiva del sistema de monitoreo en línea con los sistemas de control del proceso, facilitando la supervisión y toma de decisiones operacionales.
- Reducción de la variabilidad de las variables críticas del proceso, evidenciando una mejora en la estabilidad operacional.
- Disminución de la dependencia de muestreos manuales y detección tardía de desviaciones del proceso
- Mejora en la toma de decisiones operacionales, desde un enfoque de respuesta reactivo a pasar a un enfoque de respuesta preventivo basado en datos.
- Generación de registros históricos confiables que permitan el análisis de tendencias.

3.4.8. ESTANDARIZACIÓN DE SOLUCIONES

En el marco del análisis de las causas raíz desarrollada y su implementación del plan de acciones operativos, estas deben alinearse con principios de gestión de calidad orientados a la mejora continua y a la estandarización de procesos, esto en concordancia con los lineamientos establecidos en normas internacionales como la norma ISO 9001

- 2.1.1.1 *Capacitación sobre manipulación del sistema de monitoreo operativo en línea:* Es necesario definir procedimientos claros que regulen la revisión e interpretación de las lecturas de las variables críticas del proceso, así como las acciones operativas asociadas. Esto permite asegurar un uso adecuado del sistema y una toma de decisiones basada en información confiable y en tiempo real.
- 2.1.1.2 *Gestión y confiabilidad de los datos del proceso:* La estandarización del registro, almacenamiento y trazabilidad de los datos generados por el sistema de escaneo garantiza la disponibilidad de información consistente para el control del proceso y el análisis de su desempeño a lo largo del tiempo.
- 2.1.1.3 *Indicadores de desempeño del proceso:* La formalización de indicadores cuantificables, junto a sus métodos de cálculo y criterios de evaluación, permite medir objetivamente el impacto de las acciones implementadas y verificar el cumplimiento de los resultados esperados definidos en el plan de acción operativo.
- 2.1.1.4 *Acciones frente a desviaciones del proceso:* La definición de respuesta operativas estandarizadas ante desviaciones de los parámetros críticos contribuye a una reacción oportuna y uniforme, fortaleciendo la estabilidad y eficiencia del proceso productivo.

La estandarización de soluciones representa una etapa clave para asegurar la sostenibilidad de acciones correctivas definidas a partir del análisis de causa raíz del proceso de producción de celulosa. Este enfoque permite consolidar las mejoras implementadas, integrándolas de forma sistemática a la operación y evitando la recurrencia de las problemáticas identificadas. La formalización del uso del sistema de monitoreo en línea, la gestión confiable de los datos, la definición de indicadores de desempeño y la estandarización de las acciones frente a desviaciones aseguran la sostenibilidad de las mejoras implementadas y fortalecen el control del proceso, en coherencia de los principios de la calidad y mejora continua.

3.4.9. IMPACTO OPERATIVO DE LA SOLUCIÓN

La implementación del sistema de monitoreo continuo mediante tecnología de escaneo genera un impacto operativo relevante en el proceso de producción de celulosa, esto al permitir la obtención de información confiable y en línea de las variables críticas. Esto fortalece el control del proceso y reduce la dependencia de mediciones manuales o no continuas, mejorando la visibilidad operativa.

Adicionalmente, la disponibilidad de datos en tiempo real facilita la detección temprana de desviaciones y la aplicación de acciones correctivas oportunas, lo que contribuye a disminuir la variabilidad del proceso y a evitar interrupciones no planificadas. En conjunto, la estandarización del uso de esta información mejora la toma de decisiones operativas, promoviendo una operación más estable, eficiente y alineada con un enfoque de mejora continua.

CAPITULO III
DISEÑO DE SOLUCIÓN

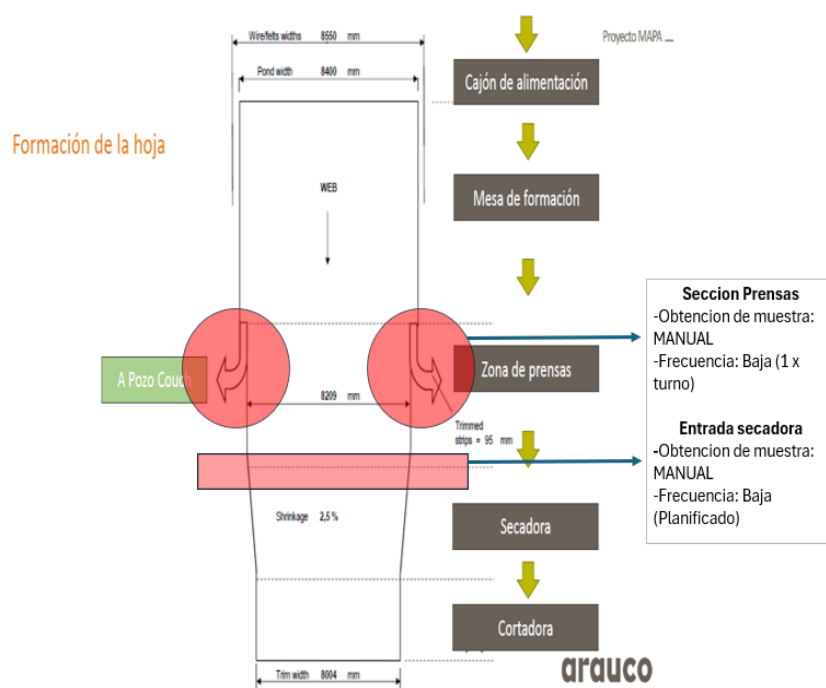
4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución propuesta consiste en la implementación de un sistema de escaneo automatizado en línea para el control y monitoreo de variables críticas del proceso de producción de celulosa, específicamente en el extremo húmedo del área de máquinas. Esta tecnología permitirá obtener datos continuos y en tiempo real sobre parámetros relevantes del proceso, mejorando la estabilidad operacional, la calidad del producto y la eficiencia global del sistema productivo.

La propuesta se orienta a reemplazar o complementar las mediciones manuales y puntuales actualmente utilizadas, incorporando una herramienta tecnológica capaz de anticipar desviaciones, reducir tiempos de normalización y fortalecer la toma de decisiones basada en datos confiables.

Figura 12

Método actual de obtención de mediciones del proceso Fuente: Arauco L3



4.2. DIAGNÓSTICO DEL ESTADO ACTUAL DEL PROCESO

4.2.1. SITUACIÓN ACTUAL DE SISTEMAS DE MEDICIÓN

Actualmente, el control de variables críticas en el proceso de producción de celulosa se realiza principalmente mediante mediciones manuales y sistemas convencionales que no entregan información continua. Estas mediciones se efectúan de forma periódica, lo que limita la representatividad de los datos y dificulta la detección temprana de desviaciones en el proceso.

La falta de datos en línea obliga a los operadores a realizar ajustes reactivos, basados en información incompleta o con retraso, afectando la estabilidad del proceso y aumentando la variabilidad del producto final

4.2.2. LIMITACIONES DEL MÉTODO ACTUAL DE CONTROL Y MONITOREO

El sistema actual presenta limitaciones importantes en términos de frecuencia de medición, precisión y tiempo de respuesta. Las mediciones manuales no permiten visualizar el comportamiento transversal de la hoja ni identificar variaciones instantáneas del proceso. Además, la dependencia de la intervención humana incrementa la probabilidad de errores y expone a los trabajadores a condiciones operacionales exigentes.

Estas limitaciones se traducen en tiempos prolongados de normalización, sobreconsumo de recursos y una mayor probabilidad de generar producto fuera de especificación.

Tabla 2

Evaluación de comparativa de la situación actual del proceso y su impacto operacional

Aspecto evaluado	Medición actual	Impacto operacional
Frecuencia de medición	Puntual / discontinua	Respuesta tardía ante desviaciones
Representatividad	Parcial	No refleja variabilidad real del proceso
Dependencia operativa	Alta intervención humana	Mayor riesgo de error
Tiempo de respuesta	Lento	Prolonga tiempos de normalización
Seguridad	Exposición directa	Riesgo para el personal

Nota: La evaluación presentada permite identificar las principales brechas del sistema actual de medición y su impacto directo en la eficiencia y estabilidad del proceso productivo.

4.2.3. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES CRÍTICAS DEL PROCESO

Las principales variables críticas identificadas en el proceso de celulosa en el área de máquinas corresponden a la humedad, el gramaje, la temperatura y la uniformidad (perfil) de la hoja de celulosa. Estas variables influyen directamente en la calidad del producto final, el consumo energético y la continuidad operacional. Su control preciso resulta fundamental para mantener la estabilidad del proceso y evitar desviaciones que puedan generar pérdidas productivas.

Tabla 3

Variables críticas del proceso productivo y efectos de su desviación en la producción de celulosa

Variable	Etapas del proceso	Unidad	Impacto en el proceso	Consecuencia de desviación
Humedad	Formación / Prensas	%	Afecta secado y consumo energético	Hoja fuera de especificación, mayor consumo de vapor
Gramaje	Formación	g/m ²	Determina calidad y uniformidad del producto	Rechazo de producto, reprocesos
Temperatura	Secado	°C	Control del contenido de humedad final	Sobre secado o humedad residual
Uniformidad de hoja	Formación / Prensas	—	Estabilidad y calidad del producto	Cortes de hoja, variabilidad de calidad

Nota: Las variables identificadas corresponden a parámetros críticos del proceso de producción de celulosa, cuyo control resulta fundamental para asegurar la eficiencia operativa y el cumplimiento de los estándares de calidad.

4.3. CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA SELECCIÓN DE LA PROPUESTA DE SOLUCIÓN

4.3.1. CRITERIOS DE SEGURIDAD

La solución propuesta se orienta a minimizar la exposición del personal a condiciones de riesgo presentes en el proceso productivo, tales como altas temperaturas, niveles elevados de ruido y la cercanía a equipos en movimiento. En este contexto, se prioriza la reducción de la intervención manual en zonas críticas de operación.

El sistema de escaneo automatizado cumple con este criterio al operar de forma continua y sin contacto directo con el producto ni con los equipos en funcionamiento. Esto permite obtener información relevante del proceso sin requerir la presencia permanente del personal en áreas potencialmente peligrosas, contribuyendo a mejorar las condiciones de seguridad laboral.

4.3.2. CRITERIOS DE PRODUCCIÓN

Desde el punto de vista productivo, la solución propuesta contribuye a una operación más estable, continua y eficiente. La medición en línea de variables críticas permite detectar desviaciones de manera temprana, facilitando la toma de acciones correctivas en tiempos adecuados.

Este enfoque permite disminuir la ocurrencia de paradas no programadas, reducir los tiempos de normalización del proceso y mejorar la continuidad operacional. Como resultado, se obtiene un proceso más controlado, con menor variabilidad y un mejor aprovechamiento de la capacidad productiva instalada.

4.3.3. CRITERIOS OPERACIONALES

La tecnología seleccionada está diseñada para ser compatible con las condiciones reales de operación de la planta, considerando factores como temperatura, humedad ambiental, vibraciones y funcionamiento continuo del proceso. Este criterio es fundamental para asegurar la confiabilidad y durabilidad del sistema en el entorno industrial.

Asimismo, la solución debe integrarse de manera efectiva con los sistemas de control existentes, tales como DCS y QCS, permitiendo una gestión centralizada de la información y evitando modificaciones significativas en la operación actual de la planta. Esto facilita la implementación y aceptación de la tecnología por parte del personal operativo.

4.3.4. CRITERIOS MEDIO AMBIENTE

Un control más preciso del proceso productivo contribuye a la reducción del consumo de recursos como energía, agua y materias primas, lo que se traduce en un menor impacto ambiental. La disminución de reprocesos y pérdidas de producto permite una operación más eficiente y sostenible.

En este sentido, la solución propuesta se alinea con principios de producción más limpia y prácticas industriales sostenibles, aportando al cumplimiento de objetivos medioambientales y normativos asociados a la operación de la planta.

Tabla 4

Criterios de verificación del cumplimiento del plan de estandarización

Criterio	Descripción	Cumplimiento
Seguridad	Reduce intervención manual	Sí
Producción	Mejora estabilidad del proceso	Sí
Operación	Compatible con proceso continuo	Sí
Medio ambiente	Optimiza uso de recursos	Sí

Nota: Los criterios presentados permiten verificar el grado de implementación y sostenibilidad de las soluciones estandarizadas dentro del sistema de gestión del proceso.

4.4. SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA DE ESCANEEO AUTOMATIZADO

4.4.1.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE TECNOLOGÍAS DISPONIBLES

Se analizaron distintas tecnologías de medición en línea, tales como sensores NIR, pirómetros infrarrojos, microondas y espectrofotometría óptica. Cada una presenta ventajas específicas según la variable a medir, el entorno de operación y la precisión requerida.

Tabla 5

Tecnologías de medición disponibles, variables medidas, ventajas y limitaciones

Tecnología	Variables medidas	Ventajas	Limitaciones
NIR	Humedad	Rápida, sin contacto	Sensible a calibración
Pirómetro IR	Temperatura	Alta velocidad de respuesta	Influencia de emisividad
Microondas	Humedad, densidad	Alta penetración	Mayor costo
Óptica	Blancura, uniformidad	Alta resolución superficial	Limitada en ambientes sucios

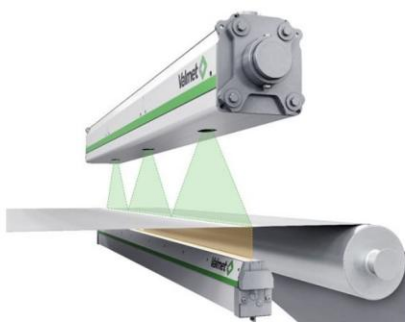
Nota: La tabla presenta ejemplos de tecnologías comúnmente utilizadas en estudios de medición, junto con las variables que evalúan, sus principales ventajas y limitaciones.

4.4.2. JUSTIFICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA SELECCIONADA

La tecnología de escaneo automatizado con sensores NIR y ópticos resulta la más adecuada para el monitoreo continuo de humedad, gramaje y calidad superficial de la hoja de celulosa. Su capacidad de medición sin contacto, alta precisión y rápida respuesta la convierten en una solución óptima para procesos continuos como el de producción de celulosa.

Figura 13

Principio de funcionamiento del scanner seleccionado Fuente: Valmet



4.4.3. SELECCIÓN DEL TIPO DE SCANNER Y SENSORES ASOCIADOS

El scanner seleccionado corresponde a un sistema transversal en línea que corresponde a un scanner Valmet IQ (Quality Control System QCS) correspondiente a un modelo de scanner de la cuarta generación, equipado con sensores de humedad, gramaje, temperatura y blancura capaz de recorrer el ancho total de la hoja y generar perfiles completos del producto en tiempo real.

Esto a diferencia de las mediciones manuales actuales, que son discretas y conllevan un alto error de muestreo, el escáner Valmet proporciona una medición continua y no destructiva de la hoja de celulosa en movimiento.

Tabla 6

Especificaciones de los componentes del sistema de monitoreo

Componente	Función	Ubicación
Scanner transversal	Medición continua del producto	Extremo húmedo
Sensor de humedad	Medición % humedad	Línea de hoja
Sensor de gramaje	Control de masa por área (g/m ²)	Línea de hoja
Sensor de temperatura	Medición continua de temperatura del producto	Línea de hoja
Unidad de procesamiento	Análisis de datos	Sala de control
Interfaz de visualización	Monitoreo en tiempo real	DCS / QCS

Nota: Datos obtenidos del diagrama de instrumentación del sistema VALMET

4.5. DISEÑO DE LA SOLUCION PROPUESTA

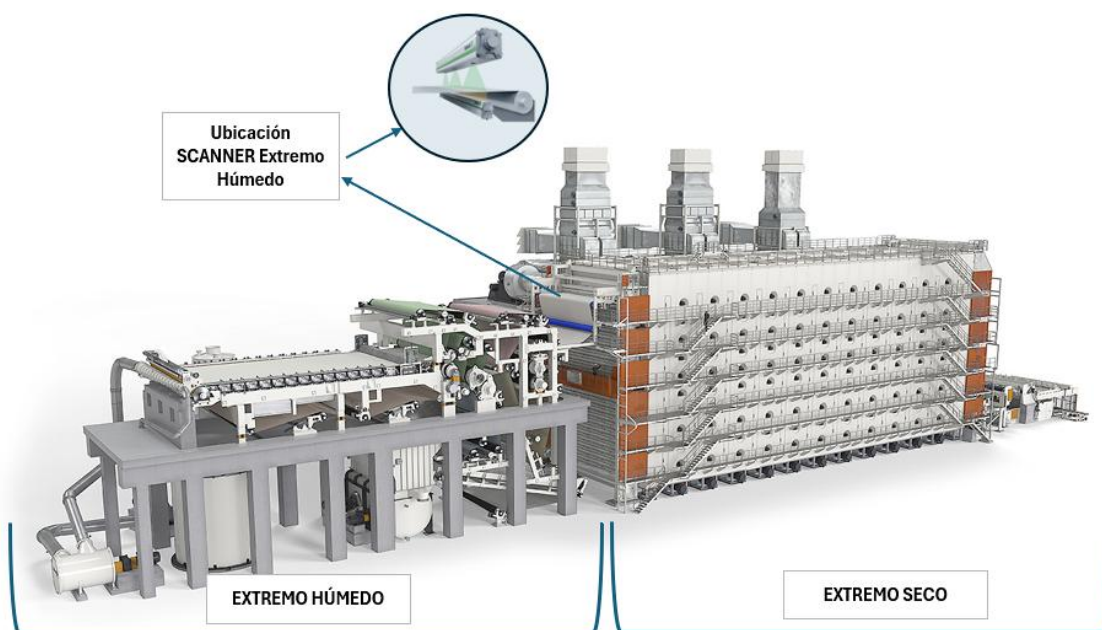
4.5.1. UBICACIÓN DEL SCANNER EN EL PROCESO PRODUCTIVO

El scanner se ubicará en el extremo húmedo del proceso productivo, posterior a las etapas de formación y prensado de la hoja de celulosa. Esta ubicación estratégica permite realizar un control temprano de variables críticas, lo que resulta fundamental para la estabilidad del proceso en las etapas posteriores.

La selección de este punto de instalación se justifica técnicamente debido a que las desviaciones detectadas en esta zona pueden ser corregidas de manera oportuna, evitando que se propaguen aguas abajo y generen pérdidas de calidad o inestabilidad operacional. Asimismo, la ubicación propuesta facilita el acceso al equipo para labores de mantenimiento y no interfiere con el flujo normal del proceso productivo.

Figura 14

Ubicación sistema de escaneo en proceso productivo celulosa área de máquinas Fuente: Valmet Y ELABORACIÓN PROPIA



4.5.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN EN EL EXTREMO HÚMEDO

El sistema de escaneo automatizado realizará mediciones continuas y sin contacto directo con la hoja de celulosa, lo que permite obtener información en tiempo real sin interferir con el flujo productivo. El scanner se desplaza transversalmente sobre la hoja en movimiento, capturando datos representativos de las condiciones reales del proceso. Las mediciones entregadas por el sistema permiten conocer de manera instantánea el estado de la hoja, facilitando la identificación temprana de desviaciones y la realización de ajustes oportunos en los parámetros de operación. De este modo, el sistema contribuye a mejorar la estabilidad del proceso, la calidad del producto final y la eficiencia operacional.

Figura 15

Sistema de escaneo en operación Fuente: Valmet



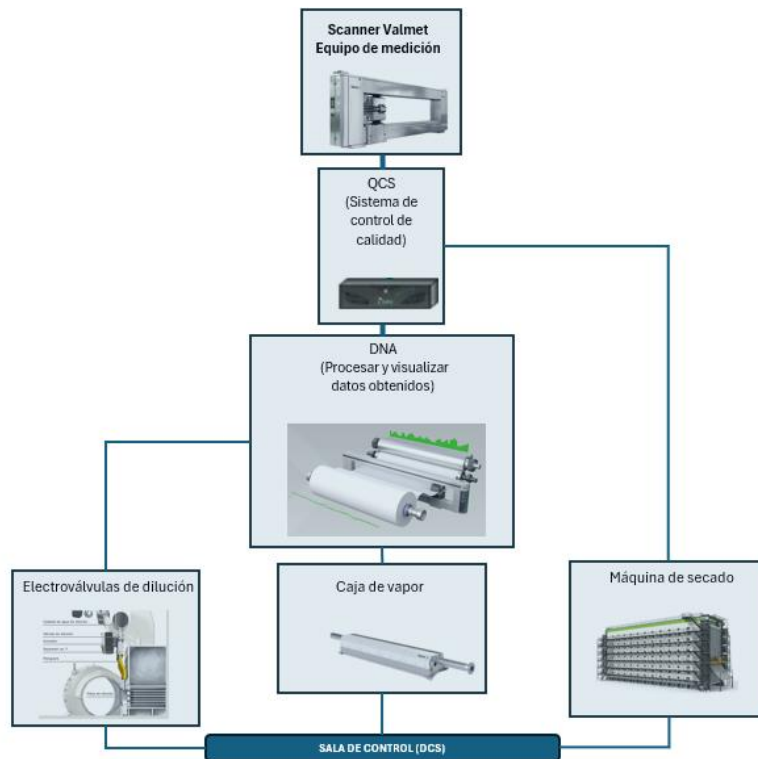
4.5.3. ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL

La arquitectura del sistema de monitoreo y control considera un conjunto integrado de sensores de medición, una unidad de adquisición y procesamiento de datos, sistemas de visualización y la comunicación con el control central de la planta. Esta configuración permite transformar las mediciones obtenidas por el scanner en información útil para el control operacional y la toma de decisiones.

El sistema se integra con los sistemas de control existentes, como DCS y QCS, asegurando una comunicación fluida y confiable de los datos en tiempo real. Esta arquitectura facilita el acceso a la información por parte de operadores y personal técnico, permite el análisis histórico de los datos y respalda la implementación de acciones de mejora continua en el proceso productivo.

Figura 16

Diagrama de flujo sistema de monitoreo y control (Sensores-procesamiento-visualización-control) Fuente: Elaboración Propia



4.5.4. INTEGRACIÓN DE SISTEMAS EXISTENTES (QCS/DCS)

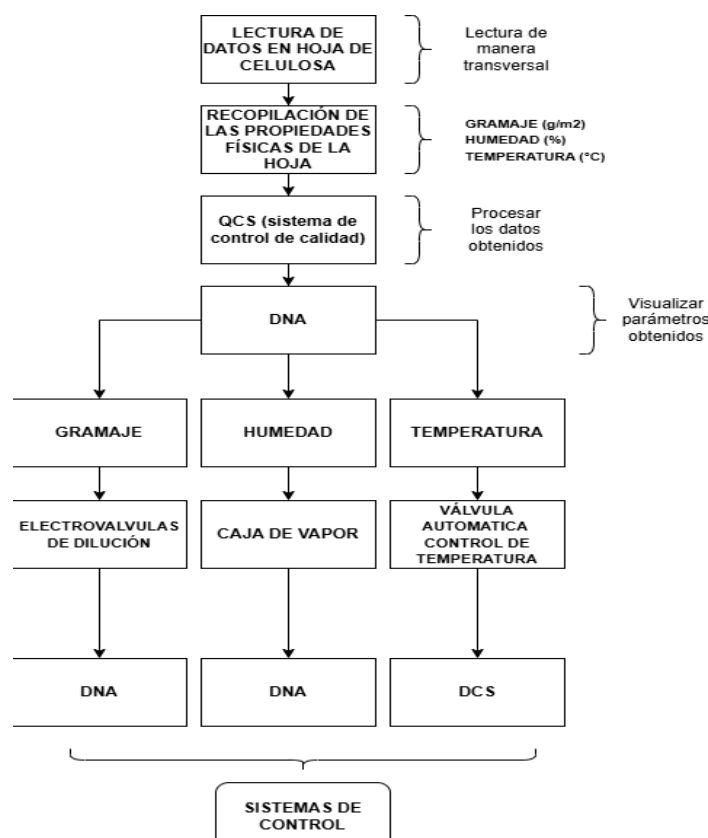
Los datos obtenidos por el sistema de escaneo automatizado serán integrados con los sistemas de control distribuido (DCS) y de control de calidad (QCS) existentes en la planta, permitiendo una gestión centralizada y eficiente de la información del proceso. Esta integración posibilita que las variables medidas en línea, tales como humedad, gramaje, temperatura y uniformidad de la hoja, sean visualizadas y analizadas en tiempo real desde la sala de control.

La comunicación entre el scanner y los sistemas DCS/QCS se realiza a través de servidores de datos industriales, los cuales procesan, almacenan y distribuyen la información de manera segura y confiable. De este modo, los datos pueden ser utilizados tanto para el control automático del proceso, mediante la generación de alarmas y ajustes de parámetros operacionales, como para el análisis histórico y la toma de decisiones estratégicas orientadas a la mejora continua.

La compatibilidad del sistema de escaneo con las plataformas de control existentes permite su incorporación sin alterar la lógica operativa de la planta, facilitando la implementación y asegurando la continuidad del proceso productivo.

Figura 17

Diagrama Conceptual Integración del scanner con el QCS Y DCS Fuente: Elaboración propia



4.6. RECOPIACIÓN Y GESTIÓN DE DATOS

4.6.1. VARIABLES MONITOREADAS EN LÍNEA

Las variables monitoreadas por el sistema de escaneo automatizado incluyen la humedad, el gramaje, la temperatura y la uniformidad de la hoja de celulosa, las cuales son consideradas críticas para la estabilidad y el control del proceso productivo. Estas variables influyen directamente en la calidad del producto final, el consumo de recursos y la continuidad operacional.

El monitoreo continuo de dichas variables permite detectar desviaciones de manera temprana, reducir la variabilidad del proceso y anticipar posibles fallas operacionales. De este modo, se facilita la realización de ajustes oportunos, contribuyendo a una operación más estable, eficiente y alineada con los estándares de calidad establecidos.

Tabla 7

Variables monitoreadas por el sistema de escaneo y frecuencia de medición por variable

Variable	Tipo de sensor	Frecuencia
Humedad	NIR	Continua
Gramaje	Sensor óptico	Continua
Temperatura	IR	Continua
Uniformidad	Scanner transversal	Continua

Nota: Especificaciones de los sensores utilizados en línea de producción

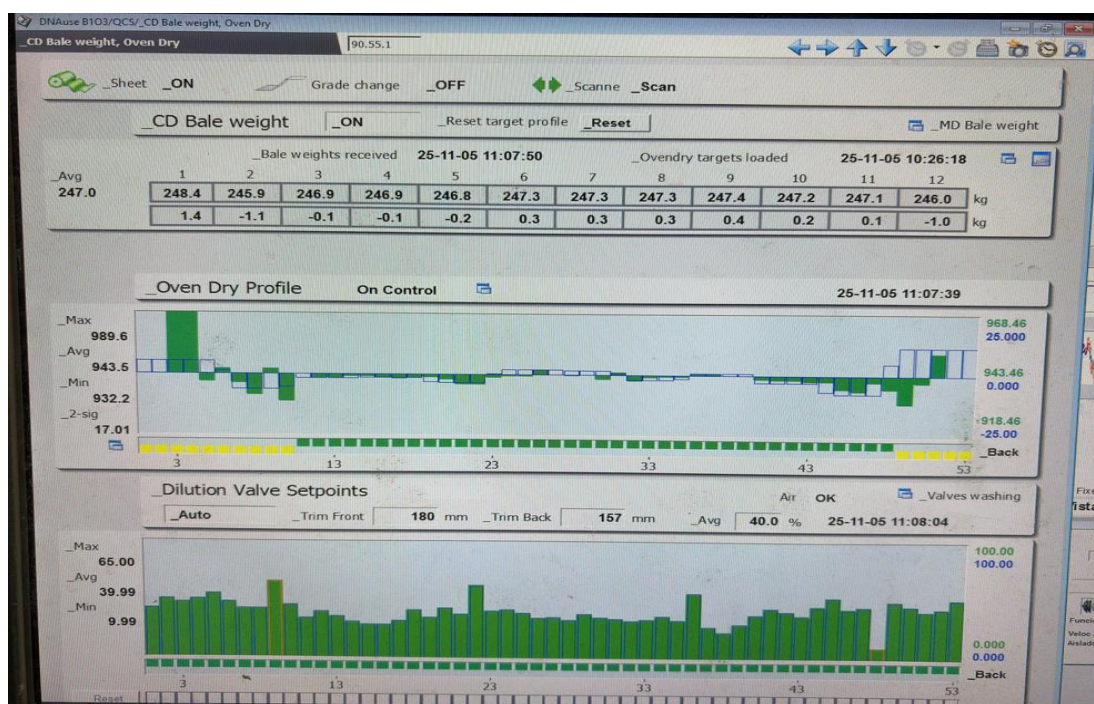
4.6.2. FRECUENCIA Y FORMATO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos se realiza de forma continua, permitiendo obtener información en tiempo real sobre el comportamiento del proceso. Esta alta frecuencia de medición asegura una representación precisa de la variabilidad del proceso, a diferencia de los métodos tradicionales de medición puntual.

Los datos obtenidos se presentan en formatos gráficos y numéricos, tales como tendencias temporales, perfiles transversales y valores instantáneos, lo que facilita su interpretación por parte de los operadores y personal técnico. Estos formatos permiten una rápida identificación de desviaciones y una toma de decisiones más informada durante la operación del proceso.

Figura 18

Ejemplo perfil del producto recopilado en línea Fuente: MAPA L3



Nota: Ilustración DNA MAPA L3

4.6.3. ALMACENAMIENTO Y VISUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA

La información recopilada por el sistema de escaneo automatizado se almacena en los sistemas de la planta, asegurando su disponibilidad para análisis posterior y trazabilidad del proceso. El almacenamiento de datos históricos permite evaluar el desempeño del proceso en el tiempo, identificar patrones de comportamiento y apoyar la implementación de acciones de mejora continua.

Asimismo, la visualización de la información se realiza a través de los sistemas de control y monitoreo existentes, como DCS y QCS, donde los operadores pueden acceder a tendencias, alarmas y reportes en tiempo real. Esto contribuye a un control más efectivo del proceso y a una gestión operacional basada en datos confiables.

4.7. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA SOLUCIÓN

4.7.1. IMPACTO EN LA ESTABILIDAD DEL PROCESO

La medición en tiempo real de variables críticas como humedad, gramaje, temperatura y uniformidad de la hoja permite reducir la variabilidad del proceso productivo. Al contar con información continua, los operadores pueden identificar desviaciones de manera inmediata y realizar ajustes oportunos, evitando fluctuaciones prolongadas en los parámetros de operación.

Esta mejora en la capacidad de monitoreo contribuye a una mayor estabilidad operacional, disminuyendo la ocurrencia de eventos no deseados como cortes de hoja, defectos de calidad o desalineaciones en las condiciones del proceso, lo que se traduce en una operación más controlada y predecible.

4.7.2. IMPACTO EN LA PRODUCTIVIDAD Y EFICIENCIA OPERACIONAL

Una mayor estabilidad del proceso tiene un efecto directo en la productividad y eficiencia operacional de la planta. La reducción de variaciones y ajustes repetitivos permite mantener la línea de producción en condiciones óptimas por períodos más prolongados, aumentando el tiempo efectivo de producción.

Además, la medición continua facilita una mejor utilización de los recursos, como energía, vapor y materias primas, al evitar sobreajustes y reprocesos. Como resultado, se logra una operación más eficiente, con menores pérdidas y una mejor relación entre los recursos utilizados y el producto obtenido.

4.7.3. IMPACTO EN LA REDUCCIÓN DE TIEMPOS PÉRDIDOS DE NORMALIZACIÓN

La detección temprana de desviaciones mediante el sistema de escaneo automatizado permite actuar antes de que estas se conviertan en perturbaciones mayores del proceso. Esto reduce significativamente los tiempos necesarios para normalizar las condiciones de operación tras eventos como ajustes, cambios de carga o variaciones en las materias primas.

Al disminuir los tiempos de normalización, se reduce también el tiempo no productivo asociado a la recuperación del proceso, lo que impacta positivamente en la continuidad operacional y en la eficiencia global del sistema productivo.

4.7.4. IMPACTO EN SEGURIDAD Y CONDICIONES DE TRABAJO

La automatización del monitoreo del proceso disminuye la necesidad de intervención manual en zonas de operación con altas temperaturas, ruido y movimiento de equipos. Esto reduce la exposición del personal a condiciones de riesgo, mejorando las condiciones de seguridad y salud ocupacional.

Asimismo, al disminuir la frecuencia de ajustes manuales y recorridos operacionales, se reduce la carga física y el estrés asociado a la operación del proceso, contribuyendo a un entorno de trabajo más seguro y controlado.

Tabla 8

Comparativa operativa entre la situación actual y la implementación del scanner

Aspecto	Situación actual	Situación con scanner
Estabilidad del proceso	Variable	Alta
Tiempo de normalización	Alto	Reducido
Consumo de recursos	Elevado	Optimizado
Seguridad operativa	Exposición directa	Menor exposición

Nota: Análisis comparativo de indicadores de desempeño antes y después de una implementación del sistema de escaneo.

4.8. ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA SOLUCIÓN

4.8.1. VIABILIDAD TÉCNICA

La solución propuesta es técnicamente viable debido a la disponibilidad de tecnologías de escaneo automatizado ampliamente probadas en procesos industriales continuos, particularmente en la industria de la celulosa. Los sistemas de medición seleccionados son compatibles con las condiciones de operación del proceso, tales como altas temperaturas, humedad, vibraciones y funcionamiento continuo.

Asimismo, la integración del sistema de escaneo con los sistemas de control existentes (DCS y QCS) es factible desde el punto de vista técnico, ya que estas plataformas permiten la incorporación de nuevas fuentes de datos sin alterar la lógica de control del proceso. Esto garantiza que la implementación de la solución no requiera modificaciones estructurales significativas y pueda realizarse de manera segura y controlada.

4.8.2. VIABILIDAD ECONÓMICA

Desde el punto de vista económico, la implementación del sistema de escaneo automatizado se justifica por los beneficios asociados a la mejora de la eficiencia operacional y la reducción de pérdidas productivas. La disponibilidad de datos en tiempo real permite disminuir la generación de producto fuera de especificación, reducir reprocesos y acortar los tiempos de normalización del proceso, lo que impacta directamente en los costos operativos.

Si bien la inversión inicial en tecnología puede ser significativa, los ahorros derivados de una operación más estable y eficiente permiten recuperar la inversión a mediano y largo plazo. En este contexto, la solución propuesta se presenta como una alternativa económicamente viable, alineada con los objetivos de optimización de costos y aumento de la competitividad del proceso productivo.

4.8.3. VIABILIDAD OPERATIVA

La viabilidad operativa de la solución se sustenta en su capacidad de integrarse a la operación continua de la planta sin generar interrupciones significativas. El sistema de escaneo automatizado está diseñado para operar de forma permanente y con un alto nivel de confiabilidad, lo que facilita su adopción en el entorno industrial existente.

Además, la operación y el mantenimiento del sistema pueden ser asumidos por el personal actual de la planta, siempre que se realice la capacitación correspondiente. Esto permite una gestión eficiente de la solución sin requerir cambios mayores en la estructura organizacional, asegurando su correcta utilización y sostenibilidad en el tiempo.

CAPITULO IV
ESTUDIO ECONÓMICO

5.1. OBJETIVO DEL ESTUDIO ECONÓMICO

Este capítulo tiene como finalidad evaluar la viabilidad económica de la implementación de una propuesta de un sistema de escaneo automatizado para controlar y monitorear variables críticas del proceso de producción de celulosa. Este estudio económico mide la justificación de la inversión que se requiere para la incorporación de esta tecnología, en función de los beneficios que se derivan de la propia operación y de la producción, en función de la reducción de interrupciones del proceso, de la disminución de la variabilidad operativa y del aprovechamiento de los recursos.

El estudio se desarrolla como una extensión del análisis técnico que hemos presentado en los capítulos anteriores, y que respalda la propuesta no solo en cuanto a la parte de operación, sino también desde el punto de vista económico, presente y futuro, bajo criterios de eficiencia y sostenibilidad del proceso de producción.

El objetivo tendrá camino de evaluar la viabilidad de implementar la tecnología de escaneo basado en una mejora continua sobre el proceso de producción de celulosa. Donde se estudió estadísticamente sobre los años 2024 y 2025 en donde el proceso productivo estuvo en servicio, considerando que en estos años se han realizado registros sobre eventos de interrupciones en el proceso.

5.2. ALCANCE Y SUPUESTOS DEL ANÁLISIS

El estudio económico se desarrolla mediante un análisis entre la situación actual del proceso productivo del área de máquinas y el resultado del proceso después de implementar el sistema de escaneo automatizado en el extremo húmedo del proceso productivo de celulosa en el área de máquinas.

- Costos de inversión asociados a la implementación del sistema de escaneo.
- Costos de operación y mantenimiento.

5.3. IDENTIFICACIÓN DE COSTOS DE INVERSIÓN (capex)

La inversión inicial requerida para la implementación del sistema de escaneo automatizado considerando los costos asociados a la adquisición del equipamiento, su instalación e integración con los sistemas de control existentes, así como las actividades necesarias para su correcta puesta en marcha.

Tabla 9

Estimación de la inversión inicial para la implementación del sistema de escaneo IQ Valmet

Descripción		Costo estimado (USD)
Scanner transversal IQ Valmet	Estructura y carro de escaneo	480.000
Sensores de proceso	Humedad, gramaje y temperatura	220.000
Ingeniería e integración	Integración QCS / DCS	120.000
Montaje mecánico y eléctrico	Instalación en área de máquinas	80.000
Puesta en marcha y calibración	Pruebas y validación	50.000
Capacitación del personal	Operación y mantenimiento	20.000
Inversión total estimada		970.000

Nota: Los valores presentados corresponden a estimaciones referenciales basadas en costos de mercado para sistemas de control de calidad QCS utilizados en la industria de celulosa. Los montos se expresan en dólares y pueden tener variaciones según su proveedor.

5.4. COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (opex)

El mantenimiento preventivo considera actividades de inspección periódica, verificación de componentes mecánicos, electrónicos, y ajustes programados, con el objetivo de minimizar fallas no planificadas y extender la vida útil del equipamiento. Donde la calibración de sensores resulta fundamental para garantizar la exactitud de las mediciones de humedad, gramaje, temperatura y uniformidad de la hoja, siendo estas variables críticas para el control de calidad del proceso de producción de celulosa en el área de máquinas.

Finalmente, se incluye el costo asociado al soporte técnico especializado, el cual contempla asistencia técnica ante eventuales fallas, actualizaciones menores y apoyo en la resolución de problemas operacionales. En conjunto, el costo operacional anual desde sistema de escaneo automatizado se estima en USD 40.000.

Tabla 10

Estimación costos operacionales anuales del sistema de escaneo

Concepto	Descripción	Costo anual (USD)
Mantenimiento preventivo	Inspecciones y ajustes programados	15.000
Calibración de sensores	Calibración periódica	10.000
Soporte técnico	Asistencia especializada	15.000
Costo anual total		40.000

Nota: Estos costos de operaciones anuales corresponden a estimaciones referenciales asociadas a la operación y mantenimiento del sistema de escaneo automatizado IQ Valmet.

5.5. IDENTIFICACIÓN DE BENEFICIOS ECONÓMICOS

La optimización económica derivada del puesto en práctica del sistema de escaneo automatizado se deriva de los beneficios de control del proceso de producción. La posibilidad ofrecida por los sistemas de tener acceso a la información de manera continua permite prever los errores del proceso de producción, evitando procesos no deseados y paradas del proceso de producción. Esto facilita una producción estable y eficiente de productos en la línea de producción, evitando mejores por producto no ajustado y/o producto fuera de especificación. Esto se traduce directamente en beneficios económicos.

Los principales beneficios económicos identificados:

- Reducción de paradas no programadas.
- Disminución de producto fuera de especificación y reprocesos.
- Optimización del consumo de recursos energéticos y materias primas.

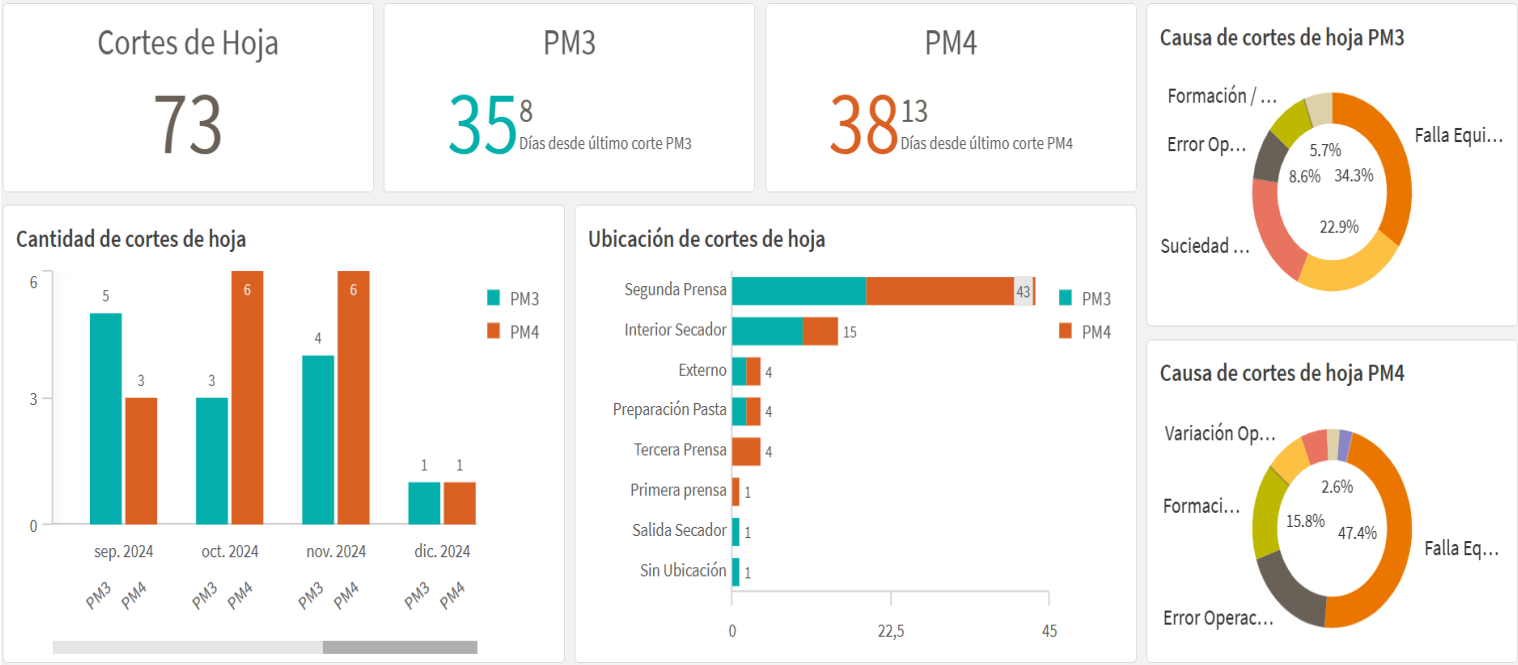
5.6. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PROPUESTA

5.6.1. AHORRO POR REDUCCIÓN DE DETENCIONES

Considerando que una detención no programada del proceso productivo puede requerir aproximadamente seis horas de normalización luego de la interrupción, la implementación del sistema de escaneo permite detectar desviaciones en etapas tempranas de proceso de producción de celulosa, reduciendo tanto la frecuencia como la duración de estas paradas no programadas.

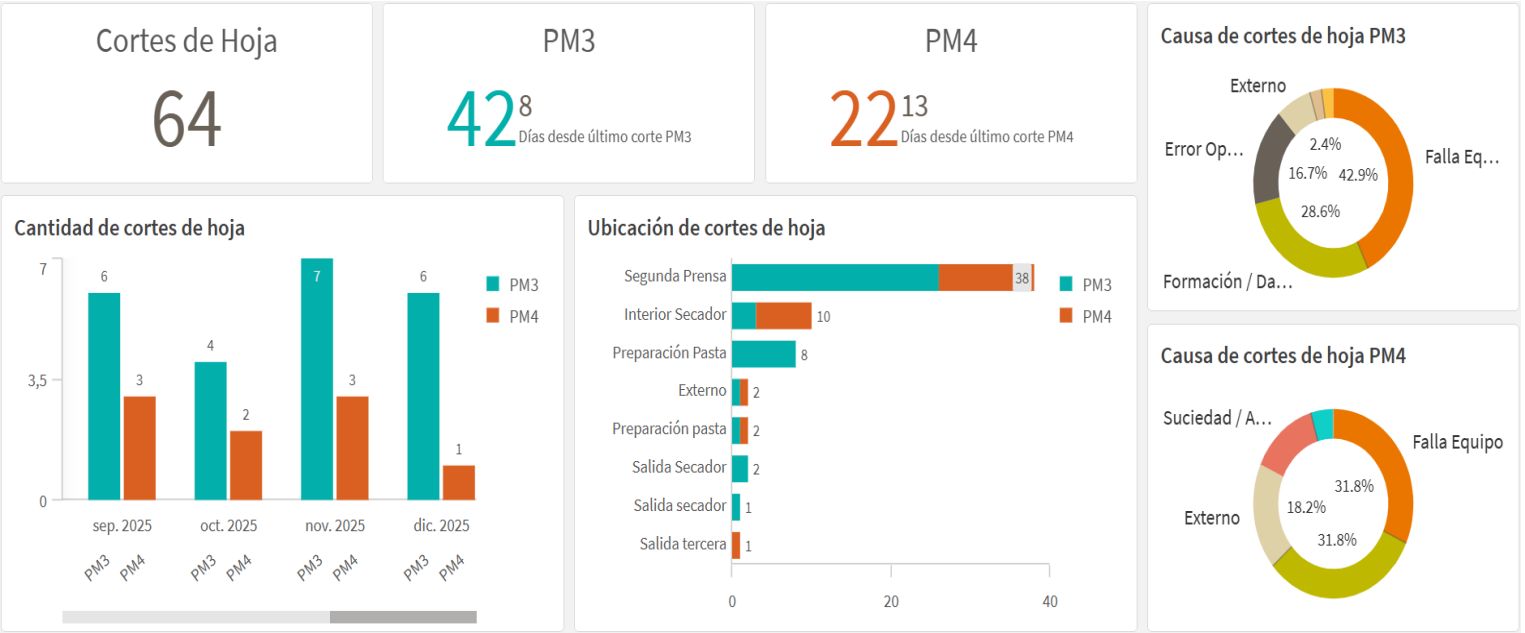
Los periodos estudiados y analizados fueron 2024 y 2025, enfocado en una de las máquinas de producción correspondiente a PM3.

Figura 19
Análisis de cortes de hojas en líneas de producción PM3 y PM4, periodo 2024. Fuente: MAPA L3



Nota: La figura presenta indicadores de desempeño asociados a los cortes de hoja registrados en las líneas PM3 Y PM4 del periodo 2024, incluyendo la cantidad total de eventos, días transcurridos desde el ultimo corte, distribución temporal, ubicación dentro del proceso y causas asociadas a cada evento.

Figura 20
Análisis de cortes de hojas en líneas de producción PM3 y PM4, periodo 2025. Fuente: MAPA L3



Nota: La figura presenta indicadores de desempeño asociados a los cortes de hoja registrados en las líneas PM3 Y PM4 del periodo 2025, incluyendo la cantidad total de eventos, días transcurridos desde el ultimo corte, distribución temporal, ubicación dentro del proceso y causas asociadas a cada evento.

Dada la información anterior de los análisis de cortes de hojas en líneas de producción PM3 y PM4 en sus periodos de 2024 y 2025, nos enfocaremos en realizar cálculos orientados a las pérdidas que generan estas interrupciones no programadas en la máquina de producción **PM3**. Donde los cortes de hojas representan una de las principales causas de pérdida de continuidad operacional en las máquinas de producción de celulosa, generando impactos directos en la eficiencia del proceso y en los costos de producción.

Tabla 11

*Causas y ubicaciones estudiadas de cortes de hojas en periodos 2024 y 2025 en **PM3**.*

		Período 2024	Período 2025
Causa de corte	1. Variaciones Operacionales	27.6	3.4 %
	2. Formación/Daño de hoja	10.3	37.9 %
	3. Error Operacional	6.9	20.7%
Ubicación del corte	1. Interior Del Secador	11	15
	2. Segunda Prensa	2	3

Nota: Los valores porcentuales representan la participación relativa de cada causa de corte respecto del total de eventos registrados en cada período. Los valores absolutos corresponden a la cantidad de eventos por ubicación dentro del proceso productivo.
Datos recopilados en empresa MAPA L3.

La siguiente tabla representa la estimación del valor diario de producción de las máquinas de producción, considerando una capacidad productiva de 2.500 ADT por día en régimen de operación continua durante 24 horas continuas. Para efectos del análisis económico, se utiliza un costo unitario de producción de USD 470 por ADT, valor representativo del proceso de producción de celulosa.

Tabla 12

Estimación del valor diario del costo de producción de las máquinas de producción de celulosa.

Producción Máquina 2.500 ADT/Día (24 horas)	2.500 ADT/Día * 470 USD=
Costo Producción ADT US 470	1.175.000 USD
Valor dólar (910.76) Variable a la fecha	1.175.000 USD * 910.76 = \$ 1.070.143.000

Nota: ADT corresponde a toneladas secas. Los valores presentados se utilizan como base referencial para la estimación de pérdidas productivas y económicas asociadas a detenciones por corte de hojas en las máquinas no programadas.

La tabla siguiente representa la estimación del valor diario de venta de la producción de las máquinas, considerando una capacidad productiva de 2.500 ADT por día bajo la operación continua de 24 horas. Para este análisis se utiliza un precio de venta de USD 600 por ADT, valor representativo del mercado de la celulosa para el periodo evaluado.

Tabla 13

Estimación del valor diario del costo de venta ADT de las máquinas de producción de celulosa.

Producción Máquina	2.500 ADT/Día (24 horas)	2.500 ADT/Día * 600 USD=
Costo Venta ADT	US 600	1.500.000 USD
Valor dólar (910.76) Variable a la fecha		1.500.000 USD * 910.76 = \$ 1.366.140.000

Nota: ADT corresponde a toneladas absolutamente secas. Los valores de venta presentados se utilizan como referencia para la estimación del impacto económico asociado a pérdidas de producción derivados a cortes de hojas en las máquinas de producción.

Evaluaciones de pérdidas de producción y monetarias en periodos 2024 y 2025 en máquina de producción PM3.

En la siguiente tabla se presenta los principales antecedentes considerados para la estimación de las perdidas productivas y económicas asociadas a los cortes de hojas registrados en la maquina PM3 durante el año 2024.

Tabla 14

Antecedentes de pérdidas de producción por cortes de hoja en PM3 año 2024, Fuente: Elaboración Propia

2024		
Cortes de hoja	Tiempo Interrupciones (horas) x corte	Costos
13	6	Costo Producción (ADT)
		470 USD
		Costo Venta (ADT)
		600 USD

COSTO PRODUCCIÓN ADT PULPA BLANCA PERÍODO 2024

2500 ADT/Día (Producción PM3) * 470 USD (Costo producción) = USD 1.175.000

Costo Producción día (24 horas) = 1.175.000 USD * 910,76 (Valor dólar) = \$ 1.070.143.000

Costo producción hora = \$ 1.070.143.000 / 24 = \$ 44.589.291

Pérdida costo producción por Interrupciones horas

6 horas = \$ 44.589.291 (costo producción hora) * 6 (horas interrupciones) = \$ 267.535.750

Número de cortes al año

13 cortes/año: \$ 267.535.750 (pérdida 6 horas) * 13 (cortes año) = \$ 3.477.964.750 pérdida año

COSTO VENTA ADT PULPA BLANCA PERÍODO 2024

2500 ADT/Día (Producción PM3) * 600 USD (Costo venta) = USD 1.500.000

Costo venta día (24 horas) = 1.500.000 USD * 910,76 (Valor dólar) = \$ 1.366.140.000

Costo venta hora = \$ 1.366.140.000 / 24 = **\$ 56.922.500**

Pérdida costo venta por Interrupciones horas

6 horas = \$ 56.922.500 (costo venta hora) * 6 (horas interrupciones) =

\$ 341.535.000

Número de cortes al año

13 cortes/año: \$ 341.535.000 (pérdida 6 horas) * 13 (cortes año) =

\$ 4.439.955.000 pérdida año

Tabla 15

Pérdidas económicas por detenciones no programadas en PM3 periodo 2024.

Fuente: Elaboración Propia

PÉRDIDAS POR DETENCIONES NO PROGRAMADAS PERÍODO 2024 PM3	
Costo venta	\$ 4.439.955.000 (4.867.877,86 USD)
Costo producción	\$ 3.477.964.750 (3.813.170,99 USD)
Pérdida año 2024	\$ 961.990.250 (1.054.706,87 USD)

Nota: Los valores corresponden a la estimación de pérdidas económicas derivadas de detenciones no programadas por cortes de hoja en la maquina PM3 durante el año 2024. Los montos se expresan en pesos chiles y consideran la diferencia entre el valor de venta no percibido y el costo de producción asociado a la producción detenida.

Tabla 16

*Antecedentes de pérdidas de producción por cortes de hoja en PM3 año 2025,
Fuente: Elaboración Propia*

2025		
Cortes de hoja	Tiempo Interrupciones (horas) x corte	Costos
		Costo Producción (ADT)
18	6	470 USD
		Costo Venta (ADT)
		600 USD

COSTO PRODUCCIÓN ADT PULPA BLANCA PERÍODO 2025

2500 ADT/Día (Producción PM3) * 470 USD (Costo venta) = USD 1.175.000

Costo venta día (24 horas) = 1.175.000 USD * 910,76 (Valor dólar) = \$ 1.070.143.000

Costo venta hora = \$ 1.070.143.000 / 24 = \$ 44.589.291

Pérdida costo producción por Interrupciones horas

6 horas = \$ 44.589.291 (costo producción hora) * 6 (horas interrupciones) = **\$ 267.535.746**

Número de cortes al año

18 cortes/año: \$ 267.535.746 (pérdida 6 horas) * 18 (cortes año) = **\$ 4.815.643.428 pérdida año**

COSTO VENTA ADT PULPA BLANCA PERIODO 2025

2500 ADT/Día (Producción PM3) * 600 USD (Costo producción) = USD 1.500.000

Costo Producción día (24 horas) = 1.500.000 USD * 910,76 (Valor dólar) = \$ 1.366.140.000

Costo producción hora = \$ 1.366.140.000 / 24 = \$ 56.922.500

Pérdida costo venta por Interrupciones horas

6 horas = \$ 56.922.500 (costo venta hora) * 6 (horas interrupciones) = **\$ 341.535.000**

Número de cortes al año

18 cortes/año: \$ 341.535.000 (pérdida 6 horas) * 18 (cortes año) = **\$ 6.147.630.000 pérdida año**

Tabla 17

Pérdidas económicas por detenciones no programadas en PM3 periodo 2025. Fuente: Elaboración Propia

PÉRDIDAS POR DETENCIONES NO PROGRAMADAS PERÍODO 2025 PM3	
Costo venta	\$ 6.147.630.000 (6.708.840,79 USD)
Costo producción	\$ 4.815.643.428 (5.255.474.83 USD)
Pérdida año 2025	\$ 1.331.986.572 (1.453.365,96 USD)

Nota: Los valores corresponden a la estimación de pérdidas económicas derivadas de detenciones no programadas por cortes de hoja en la maquina PM3 durante el año 2025. Los montos se expresan en pesos chiles y consideran la diferencia entre el valor de venta no percibido y el costo de producción asociado a la producción detenida.

5.6.2. AHORRO POR DISMINUCIÓN DE REPROCESOS Y PRODUCTO FUERA DE ESPECIFICACIÓN

El monitoreo de variables críticas como humedad, gramaje, la temperatura uniformidad de la hoja (perfil), permite mantener el proceso dentro de los rangos operacionales estables, disminuyendo la generación del producto fuera de especificación. Esto se traduce en una reducción de reprocesos, rechazos y pérdidas de material, impactando positivamente en los costos de producción.

5.6.3. AHORRO POR OPTIMIZACIÓN DEL USO DE RECURSOS

La mayor estabilidad del proceso reduce la necesidad de ajustes reactivos, permitiendo un uso más eficiente de recursos como vapor, energía eléctrica y materias primas. Esta optimización contribuye a una disminución de los costos operativos y a una operación más sostenible.

Tabla 18

Beneficios económicos anuales estimados

Concepto	Ahorro anual (USD)
Reducción de paradas no programadas (2024 y 2025) y reprocesos del producto	2.508.072,83 USD
Optimización de recursos energéticos	150.000 USD
Beneficio total anual	2.658.072,83 USD (\$2.420.866.411)

5.7. ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA

Tabla 19

Análisis viabilidad económica

Inversión/Beneficio	
Inversión total estimada	970.000 USD
Beneficio anual bruto (sin interrupciones)	2.658.072,83 USD
Costos anuales de operación	40.000 USD
Beneficio anual neto	3.668.072,83 USD

Nota: Bajo estas condiciones estudiadas, el período de recuperación de la inversión (payback), se estima aproximadamente 0,5 años, equivalente a seis meses de operación.

5.8. ANÁLISIS CUALITATIVO COSTO-BENEFICIO

Desde el enfoque cualitativo, la relación costo-beneficio del proyecto de implementación de la tecnología de escaneo automatizado en el proceso productivo de celulosa es altamente favorable.

Además de los ahorros económicos directos, la implementación del sistema de escaneo fortalece la toma de decisiones operacionales, reduce el riesgo asociado a la variabilidad del proceso y contribuye a una operación operacional, la seguridad personal y la sostenibilidad del proceso productivo.

5.9. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO ECONÓMICO

El estudio económico realizado demuestra que la implementación del sistema de escaneo automatizado para el monitoreo y control de variables críticas en el proceso de producción de celulosa es económicamente viable y coherente con los objetivos de eficiencia operacional de la planta de celulosa.

La inversión inicial requerida se justifica ampliamente por los beneficios económicos derivados de la reducción de paradas no programadas, disminución de reprocesos y optimización de uso de recursos.

En consecuencia, la propuesta se presenta como una solución rentable, sostenible y alineada con un enfoque de mejora continua del proceso productivo.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

La presente investigación tuvo como propósito proponer la implementación de un sistema de escaneo automatizado para el monitoreo y control de variables críticas en el proceso de producción de celulosa, con el objetivo de mejorar la precisión del control operacional, la estabilidad del proceso y la eficiencia productiva.

A partir del diagnóstico realizado en el área de máquinas, se identificó que el sistema actual de medición presenta limitaciones importantes asociadas principalmente a la baja frecuencia de medición, la dependencia de procedimientos manuales y la falta de información en tiempo real. Estas condiciones dificultan la detección temprana de desviaciones del proceso y generan respuestas operacionales tardías, lo que se traduce en una mayor variabilidad del producto, aumento en los tiempos de normalización y mayores pérdidas productivas.

En respuesta a esta problemática, se planteó la implementación de un sistema de escaneo automatizado capaz de monitorear variables críticas del proceso tales como humedad, gramaje, temperatura y uniformidad de la hoja de celulosa. Esta tecnología permite obtener datos continuos y confiables en línea, facilitando la toma de decisiones basadas en información objetiva y reduciendo la dependencia de mediciones manuales.

El análisis técnico evidenció que la tecnología propuesta es compatible con las condiciones operacionales del proceso productivo de celulosa, pudiendo integrarse con los sistemas de control existentes sin requerir modificaciones estructurales significativas. Asimismo, el análisis de viabilidad económica mostró que, si bien la implementación requiere de una inversión inicial, los beneficios asociados a la reducción de pérdidas productivas, mejora de la estabilidad operacional y optimización del uso de recursos permiten justificar su incorporación en el mediano y largo plazo.

Para culminar, la implementación de sistemas de monitoreo automatizado representa una herramienta clave para fortalecer el control de procesos industriales, contribuyendo a mejorar la eficiencia operativa, la calidad del producto final y la sostenibilidad del proceso productivo. De esta manera, la propuesta desarrollada en esta investigación se posiciona como una alternativa viable para avanzar hacia una gestión más moderna, basada en datos y alineada con los principios de mejora continua en la industria de la celulosa.

Recomendaciones:

1. Implementar gradualmente el sistema de escaneo automatizado, comenzando con pruebas piloto en sectores físicos críticos mencionados del área de máquinas, con la finalidad de evaluar su desempeño operativo antes de su adopción total.
2. Capacitar al personal operativo y de mantenimiento del área en el uso del equipo de medición en línea.

3. Establecer y dar seguimiento a indicadores de desempeño (KPIs) que permitan evaluar de manera continua el impacto del sistema de escaneo en variables como estabilidad del proceso, reducción de interrupciones, eficiencia operativa y calidad del producto.
4. Continuar desarrollando investigaciones relacionadas con tecnologías de monitoreo en línea, incorporando herramientas asociadas a la industria 4.0, tales como análisis de datos avanzados, inteligencia artificial o mantenimiento predictivo, que permitan seguir fortaleciendo la eficiencia y competitividad del proceso productivo.

BIBLIOGRAFIA / LINKCOGRAFIA

- *Kaizen - El camino hacia la mejora continua*. (s.f.). Fracttal.com. Consultado el 9 de marzo de 2026, desde <https://www.fracttal.com/es/mantenipedia/kaizen-el-camino-hacia-la-mejora-continua>
- *El análisis de la causa raíz, explicado con ejemplos y métodos*. (n.d.). Tableau. Retrieved March 9, 2026, from <https://www.tableau.com/es-mx/learn/articles/root-cause-analysis>
- *Que es el mantenimiento 4.0 y cuáles son sus objetivos*. (2023, December 6). MAQUINAUTOS; G Rodríguez. <https://maquinautos.com/mantenimiento-4-0/>
- *Valmet IQ - Scanner*. (n.d.). Valmet.com. Retrieved March 9, 2026, from <https://www.valmet.com/automation/quality-management/quality-control-system-qcs/scanners/>
- Laoyan, S. (2026, February 10). *Todo lo que necesitas saber sobre Six Sigma [2026]* • Asana. <https://asana.com/es/resources/six-sigma>
- Hayes, A. (2010, February 26). *What is six Sigma? Concept, steps, examples, and certification*. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/s/six-sigma.asp>

- *IQ scanner L.* (n.d.). Valmet.com. Retrieved March 9, 2026, from <https://www.valmet.com/automation/quality-management/quality-control-system-qcs/scanners/iq-scanner-l/>
- *IQ scanner L.* (n.d.). Valmet.com. Retrieved March 9, 2026, from <https://www.valmet.com/automation/quality-management/quality-control-system-qcs/scanners/iq-scanner-l/>
- *Process and control today.* (n.d.). Pandct.com. Retrieved March 9, 2026, from <https://www.pandct.com/news/valmet-to-supply-iq-web-inspection-system-to-yueyang-forest-paper-co-ltd-in-china/>
- Desk, P. S. A. (2022, December 7). Valmet extends quality management offering with two new scanners. *Packaging South Asia*. <https://packagingsouthasia.com/type-of-article/installation/valmet-extends-quality/>
- Valmet. (n.d.). *Client challenge*. Scribd.com. Retrieved May 10, 2025, from <https://es.scribd.com/document/419613670/02-Valmet-IQ-General?v=0.339>
- Valmet. (n.d.). *Client challenge*. Scribd.com. Retrieved July 11, 2025, from https://es.scribd.com/document/841852111/Valmet-IQ-Web-Moisture-and-Valmet-IQ-Board-Moisture-Technical-Manual-DC113440-01?_gl=1*1e2hgwz*_gcl_au*MTYxMzYwMTU2OC4xNzYwNDYxODY1LjE2Njk1OTgzNjUuMTc2MTc2ODM4OS4xNzYxNzY4NDI0&v=0.848

- Appian, R. N. (s.f.). *¿Qué es un proceso de mejora continua? Consejos para responsables de TI*. Appian.com. Consultado el 11 de mayo de 2025 desde <https://appian.com/es/blog/acp/process-mining/continuous-improvement-process-explained>
- Velázquez, A. (2018, December 12). *Diagrama de Pareto: Qué es, usos y cómo elaborarlo*. QuestionPro. <https://www.questionpro.com/blog/es/diagrama-de-pareto/>
- OMNIR: *Online near infrared moisture meter*. (2020, June 12). Finna Sensors. https://finnasensors.com/omnir-near-infrared-nir-moisture-sensor/?utm_source=google&utm_medium=ppc&utm_campaign=23055262993&utm_content=775579389811&utm_term=sensor%20nir&gad_source=1&gad_campaignid=23055262993&gbraid=0AAAAADoYcfg-j4jBvSgM6sxu-Tfe5zjPF&gclid=EAIaIQobChMIIMOVijKTkwMVbVBIAB3JmjkFEAYASAAEgKR6PD_BwE



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: Propuesta de implementación de tecnología de escaneo para el control y monitoreo de indicadores claves del proceso de producción de celulosa.

Nombre del candidato(a): Maximiliano Osvaldo Muñoz Benitez

Carrera / Grado: Ingeniería En Mantenimiento Industrial

Campus: Sede Concepción **Departamento:** Mecánica Industrial

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, , Guillermo Felipe Larson Muñoz, 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: 09-03-2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 09-03-2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.