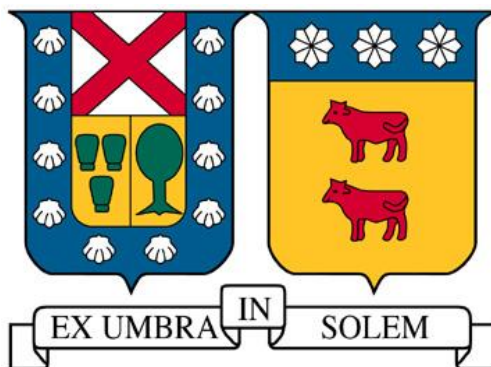


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
SANTIAGO – CHILE



"OPTIMIZACIÓN DE OPERACIONES EN PLANTAS INDUSTRIALES
MEDIANTE ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD Y GESTIÓN DE
ACTIVOS CRÍTICOS"

DAVID ANDRES CARUZ VELASQUEZ

TRABAJO FINAL PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA

: SR. RAÚL STEGMAIER BRAVO

DICIEMBRE 2025



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: Optimización de operaciones en plantas industriales mediante análisis de confiabilidad y gestión de activos críticos

Nombre del candidato(a): David Andrés Caruz Velásquez

Carrera / Grado: Magíster en Ingeniería Industrial

Campus: Santiago Vitacura ; **Departamento:** Industrias

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Raúl Stegmaier Bravo, 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

☒ 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:

☐ 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: ; **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 02-03-2026 ; **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.

1. Resumen Ejecutivo

El presente estudio analiza la disponibilidad física, criticidad y continuidad operacional de los activos relevantes de la Planta Prilado CS, con el propósito de identificar las principales restricciones del proceso productivo y desarrollar un caso de negocio técnico-económico orientado a la reducción de la indisponibilidad de activos críticos, en concordancia con los principios de la ingeniería de confiabilidad y la gestión de activos.

La metodología empleada se basa en el análisis de datos operacionales reales correspondientes al año 2024 e integra herramientas cuantitativas reconocidas en la literatura, tales como MTBF, MTTR, disponibilidad física real y esperada, matrices de criticidad, diagramas de bloques de confiabilidad (RBD), análisis de Pareto y Jackknife, además de indicadores de desempeño operacional. El análisis se desarrolló por áreas operativas, permitiendo evaluar comparativamente el impacto de cada subsistema sobre la continuidad del proceso productivo.

Los resultados evidencian que el Área 2270 concentra la mayor proporción de pérdidas anuales asociadas a la indisponibilidad del sistema, superando el 70 % del impacto económico total. Dentro de esta área, el equipo 2270-CAL-H32 fue identificado como el principal cuello de botella del proceso, debido a su elevada criticidad, operación en serie y ausencia de redundancia funcional.

A partir de estos hallazgos, se formuló una propuesta de mejora técnica consistente en la incorporación de un segundo equipo CAL-H32 en configuración redundante. La evaluación técnico-económica demuestra una reducción significativa de la indisponibilidad del área y resultados financieros favorables, con indicadores de rentabilidad que respaldan su factibilidad de implementación.

En conclusión, el estudio confirma que la aplicación sistemática de herramientas de confiabilidad y análisis económico permite sustentar decisiones de inversión orientadas a mejorar la continuidad operacional y maximizar el valor del negocio, cumpliendo los objetivos planteados para la Planta Prilado CS.

2. Índice

1.	Resumen Ejecutivo.....	2
2.	Índice	3
3.	Introducción	6
4.	Problema de Investigación	7
5.	Objetivo General y Objetivos Específicos	7
5.1.	Objetivo General	7
5.2.	Objetivos Específicos	7
6.	Alcance	9
7.	Metodología Propuesta	9
7.1.	Tipo de Investigación.....	9
7.2.	Etapas Metodológicas	9
8.	Desarrollo del Tema	12
8.1.	Levantamiento de activos	12
8.2.	Cálculo de los indicadores de confiabilidad básica de los equipos	24
8.3.	Cálculo de la Disponibilidad Física de los activos, utilizando datos históricos reales de operación y detenciones	34
8.4.	Análisis de criticidad	40
8.5.	Evaluación de la continuidad Funcional del proceso.....	43
8.6.	Identificación de cuellos de botella.....	45
8.7.	Estimación de costos asociados	49
8.8.	Caso de negocio.....	54
9.	Conclusiones.....	60

10. Bibliografía	61
11. Anexos.....	63

Ilustraciones

Ilustración 1 <i>Diagrama de proceso área 2255.....</i>	13
Ilustración 2 <i>Diagrama de procesos área 2240.</i>	15
Ilustración 3 <i>Diagrama de procesos área 2270.</i>	17
Ilustración 4 <i>Diagrama de procesos área 2252.</i>	19
Ilustración 5 <i>Diagrama de procesos área 2237.</i>	21
Ilustración 6 <i>Diagrama de procesos área 2260.</i>	23
Ilustración 7 <i>Referencia de Prill.</i>	31
Ilustración 8 <i>Gráfico jerarquización de activos críticos.</i>	42
Ilustración 9 <i>Gráfico Pareto planta Prilado año 2024.</i>	47
Ilustración 10 <i>Jackknife acumulado del año 2024 en planta Prilado.....</i>	48

Tablas

Tabla 1 <i>Equipos área alimentación y secado de nitratos.</i>	12
Tabla 2 <i>Equipos área Fusión.</i>	14
Tabla 3 <i>Equipos área DTP.....</i>	16
Tabla 4 <i>Equipos área torre de Prilado y descarga de sólidos.....</i>	18
Tabla 5 <i>Equipos área granulado Prilado.</i>	20
Tabla 6 <i>Equipos área almacenamiento, envasado y despacho.....</i>	22
Tabla 7 <i>Disponibilidad esperada por equipos en el área 2255.</i>	25
Tabla 8 <i>Disponibilidad esperada por equipos en el área 2240.</i>	26
Tabla 9 <i>Disponibilidad esperada por equipos en el área 2270.</i>	27
Tabla 10 <i>Disponibilidad esperada por equipos en el área 2252.</i>	29
Tabla 11 <i>Disponibilidad esperada por equipos en el área 2237</i>	31
Tabla 12 <i>Disponibilidad esperada por equipos en el área 2260.</i>	32
Tabla 13 <i>Disponibilidad física por equipos en el área 2255.....</i>	34
Tabla 14 <i>Disponibilidad física por equipos en el área 2240.....</i>	35

Tabla 15 Disponibilidad física por equipos en el área 2240.....	36
Tabla 16 Disponibilidad física por equipos en el área 2252.....	37
Tabla 17 Disponibilidad física por equipos en el área 2237.....	38
Tabla 18 Disponibilidad física por equipos en el área 2260.....	39
Tabla 19 Matriz de criticidad.	41
Tabla 20 Cálculos criterios para la asignación de niveles	41
Tabla 21 Listado de activos identificados como muy alta criticidad.	42
Tabla 22 OEE por equipo crítico.	44
Tabla 23 Disponibilidad esperada por áreas.	46
Tabla 24 Disponibilidad física por áreas.....	46
Tabla 25 Comportamiento económico equipos críticos.	51
Tabla 26 Distribución de pérdida esperada en toneladas y USD.	52
Tabla 27 Disponibilidad general de equipos área 2270.	55
Tabla 28 Disponibilidad general de equipos después de la mora del área 22270.	57
Tabla 29 Análisis económico de la mejora implementada.	58
Tabla 30 Flujo de caja proyecto de mejora por reducción del costo de indisponibilidad. ..	58
Tabla 31 Indicadores económicos del proyecto.	59

3. Introducción

La confiabilidad y disponibilidad de los activos productivos son elementos clave para asegurar la continuidad operacional en plantas industriales, especialmente en sistemas que operan en serie o con baja redundancia, donde cualquier detención no planificada genera pérdidas significativas de producción y afecta directamente los resultados del negocio.

La Planta Prilado CS, en operación desde el año 2007 y ampliada con la incorporación del Área 2270 en 2014, no disponía de un levantamiento integral que permitiera evaluar de manera sistemática la disponibilidad, criticidad y desempeño funcional de sus activos, bajo los lineamientos de la gestión de activos físicos establecidos por la norma ISO 55000. Esta carencia de información estructurada dificulta la identificación objetiva de equipos críticos y limita la formulación de casos de negocio cuantificados que respalden decisiones de inversión en confiabilidad.

El presente estudio aborda esta brecha mediante un análisis integral de los activos relevantes de la planta, considerando indicadores de disponibilidad esperada y física, criticidad, continuidad funcional, pérdidas económicas asociadas a la indisponibilidad y la identificación de cuellos de botella operacionales. A partir de estos resultados, se desarrolla un caso de negocio técnico-económico orientado a reducir la indisponibilidad de los activos críticos, mediante la evaluación de alternativas de mejora y su viabilidad financiera.

La metodología aplicada permite sustentar técnicamente las decisiones propuestas y validar el cumplimiento de los objetivos planteados, aportando una solución concreta para mejorar la continuidad operacional del sistema.

4. Problema de Investigación

Desde la puesta en marcha de Planta Prilado CS en 2007 y la incorporación del área 2270 DTP en 2014, no se ha realizado un levantamiento integral de activos enfocado en su disponibilidad y criticidad operacional, de acuerdo con los principios de gestión de activos físicos definidos por la norma ISO 55000.

Esta situación representa un vacío relevante en la gestión, ya que la planta opera bajo un esquema de producción en línea, con mínima redundancia o equipos stand-by, lo que aumenta el riesgo de cuellos de botella operacionales ante la falla de activos clave. La falta de visibilidad estructurada sobre cuáles equipos impacta más la continuidad operativa, y cuáles presentan mayor indisponibilidad, dificulta la toma de decisiones técnicas y financieras orientadas a mejorar el desempeño global de la planta.

El desconocimiento del impacto económico real de las detenciones asociadas a los activos críticos impide además el desarrollo de casos de negocio con fundamentos cuantificables, que puedan justificar inversiones o mejoras en mantenimiento.

5. Objetivo General y Objetivos Específicos

5.1. Objetivo General

Realizar un levantamiento de la disponibilidad de activos en Planta Prilado CS durante el año 2024, identificando línea crítica y oportunidades en la continuidad operacional, con el fin de desarrollar un caso de negocio que permita disminuir la indisponibilidad de equipos críticos en al menos un 15 % y optimizar los costos asociados a fallas e indisponibilidades, mediante un análisis técnico y económico alineado con la gestión estratégica de activos físicos.

5.2. Objetivos Específicos

- Levantar y clasificar los activos principales de cada área operativa de Planta Prilado CS, considerando su función en la línea de producción, durante el primer trimestre

del año 2024, para contar con una base estructurada que permita evaluar su criticidad y disponibilidad.

- Calcular la disponibilidad de los equipos críticos y semi-críticos de Planta Prilado CS, utilizando registros históricos de detenciones y tiempos de operación correspondientes al año 2024, con el fin de establecer indicadores comparables por área y tipo de equipo.
- Determinar la criticidad de los activos, aplicando una matriz de evaluación basada en disponibilidad, impacto productivo, existencia de redundancia y consecuencias económicas, dentro del primer semestre del estudio, para priorizar decisiones técnicas y financieras.
- Identificar los activos y procesos que representan cuellos de botella operacionales, mediante análisis histórico de fallas y su impacto en la continuidad de la producción, antes del tercer trimestre del año 2024, con el fin de enfocar las acciones correctivas en los puntos más vulnerables.
- Estimar los costos asociados a la indisponibilidad de equipos críticos, considerando horas perdidas, impacto en producción y mantenimiento, y validar estos resultados con técnicas estadísticas (como Jackknife), para sustentar la magnitud económica del problema y su priorización.
- Desarrollar un caso de negocio técnico y financiero, con propuestas de acciones correctivas y/o preventivas, orientadas a reducir la indisponibilidad de activos críticos en al menos un 15 % dentro del año 2024, incluyendo estimación de retorno de inversión (ROI) y factibilidad de implementación.

6. Alcance

El estudio se desarrollará en la Planta Prilado CS, incluyendo las siguientes áreas operativas:

- Área 2255: Alimentación y Secado de Nitratos.
- Área 2240: Fusión.
- Área 2270: Planta de Descomposición Térmica.
- Área 2252: Torre de Prilado y Descarga de Sólidos
- Área 2237: Granulado Prilado.
- Área 2260: Almacenamiento, Envasado y Despacho.

El análisis se centrará en los activos involucrados directamente en la línea de producción, excluyendo servicios auxiliares no vinculados a la continuidad operativa (ejemplo: oficinas, infraestructura no crítica).

Se considerará el período operacional de un año corrido (2024). El foco estará en la identificación de activos críticos, medición de disponibilidad, estimación de impacto económico por indisponibilidad y propuesta de mejora.

7. Metodología Propuesta

7.1. Tipo de Investigación

- Descriptiva y cuantitativa, con un enfoque mixto técnico-estratégico.
- Aplicación de principios de la norma ISO 55000, centrados en el análisis de criticidad y disponibilidad.

7.2. Etapas Metodológicas

1. Levantamiento de activos:

- Revisión de documentación técnica y diagramas de procesos.

- Registro y clasificación de equipos por área funcional.
- Identificación de equipos sin respaldo o redundancia.

2. Cálculo de los indicadores de confiabilidad básica de los equipos:

- MTBF (Mean Time Between Failures): Tiempo medio entre fallas.
- MTTR (Mean Time To Repair): Tiempo medio de reparación.

Se aplicará la fórmula tradicional para disponibilidad esperada:

$$\text{Disponibilidad Esperada} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (1)$$

Para aquellos equipos que no registraron eventos de detención durante el período analizado (TFS = 0), no se estimaron indicadores estadísticos como MTBF o MTTR, dado que no existen fallas observadas que permitan su cálculo´.

3. Cálculo de la Disponibilidad Física de los activos, utilizando datos históricos reales de operación y detenciones:

$$\text{Disponibilidad Física} = \frac{\text{Horas reales operativas}}{\text{Horas reales operativas} + \text{Horas reales detenidas}} \quad (2)$$

La disponibilidad física se calcula por área operativa y no como producto de disponibilidades individuales, de acuerdo con la configuración funcional del sistema

Esta medición permitirá validar o ajustar las estimaciones obtenidas en el paso anterior, considerando el comportamiento operativo real de los activos.

4. Análisis de criticidad:

➤ Uso de una matriz de criticidad, considerando:

- Nivel de disponibilidad
- Impacto en la producción
- Redundancia o capacidad de reemplazo
- Consecuencias de falla (medio ambiente, económicas y de seguridad)

5. Evaluación de la continuidad funcional del proceso no solo en función de la disponibilidad, sino también incorporando indicadores de utilización y habilidad operativa a través del cálculo del OEE (Overall Equipment Effectiveness) de los activos críticos, conforme a la siguiente estructura:
- Disponibilidad: Proporción del tiempo en que los activos estuvieron operativos respecto al tiempo planificado.
 - Rendimiento: Comparación entre la velocidad real de operación y la velocidad teórica o ideal.
 - Calidad: Relación entre producto conforme y el total de producto procesado.

Se aplicará la fórmula general:

$$OEE = Disponibilidad \times Rendimiento \times Calidad \quad (3)$$

6. Identificación de cuellos de botella:

- Detección de equipos cuya falla afecta directamente la producción total.
- Análisis del comportamiento histórico de detenciones en equipos clave.

7. Estimación de costos asociados:

- Cálculo del costo por hora de detención.
- Estimación de pérdidas por indisponibilidad.
- Evaluación del impacto financiero de los activos más críticos.

8. Caso de negocio:

- Desarrollo de una propuesta técnica y financiera.
- Justificación basada en reducción de costos por falla.
- Estimación del retorno de inversión (ROI) si se aplican las mejoras propuestas.
- Objetivo: reducción de al menos un 15 % en la indisponibilidad de equipos críticos.

8. Desarrollo del Tema

8.1. Levantamiento de activos

Se realiza levantamiento de activos revisando documentación técnica y diagramas de proceso antiguos y nuevos, además se incorporan los nuevos equipos que se han ido agregando durante el tiempo de funcionamiento de la planta Prilado.

Las áreas son las antes mencionadas y se registran los siguientes equipos con su respectivo flujo de operación por área:

- Área 2255: Alimentación y Secado de Nitratos.

Tabla 1

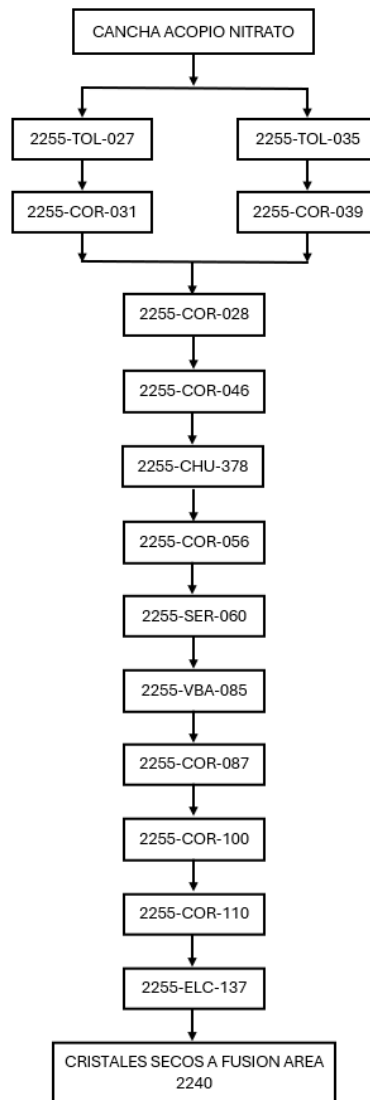
Equipos área alimentación y secado de nitratos.

Equipos	Descripción
2255-TOL-027	Tolva
2255-COR-031	Correa
2255-TOL-035	Tolva
2255-COR-039	Correa
2255-COR-028	Correa
2255-COR-046	Correa
2255-VBA-042	Vibrador skako
2255-CHU-378	Chute
2255-COR-056	Correa
2255-SER-050	Secador rotatorio
2255-COR-087	Correa
2255-COR-100	Correa
2255-COR-110	Correa
2255-ELC-137	Elevador de capachos

Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 1

Diagrama de proceso área 2255.



Nota. El diagrama muestra la secuencia operativa desde la cancha de acopio de nitrato hasta la descarga hacia el área 2240.

Fuente. Elaboración propia.

El proceso productivo mostrado en el diagrama corresponde a una configuración de tipo serie-paralelo, donde el flujo se origina en la Cancha de Acopio de Nitrato y se distribuye hacia dos líneas paralelas iniciales conformadas por los equipos TOL-027 / COR-031 y TOL-035 / COR-039, las cuales operan en forma redundante para la alimentación del

sistema. Ambas líneas confluyen en la COR-028, iniciando un tren de equipos conectados en serie que mantiene la secuencia operativa del proceso.

Posteriormente, el material avanza de manera continua por las etapas COR-046, CHU-378, COR-056, SER-060, VBA-085, COR-087, COR-100, COR-110 y finalmente ELC-137, donde el producto, ya en condición de cristales secos, es transferido hacia el área 2240 para su proceso de fusión. En conjunto, el sistema representa una línea de transporte y acondicionamiento de nitrato, en la cual las etapas iniciales en paralelo aseguran la alimentación continua y las etapas posteriores en serie.

- Área 2240: Fusión.

Tabla 2

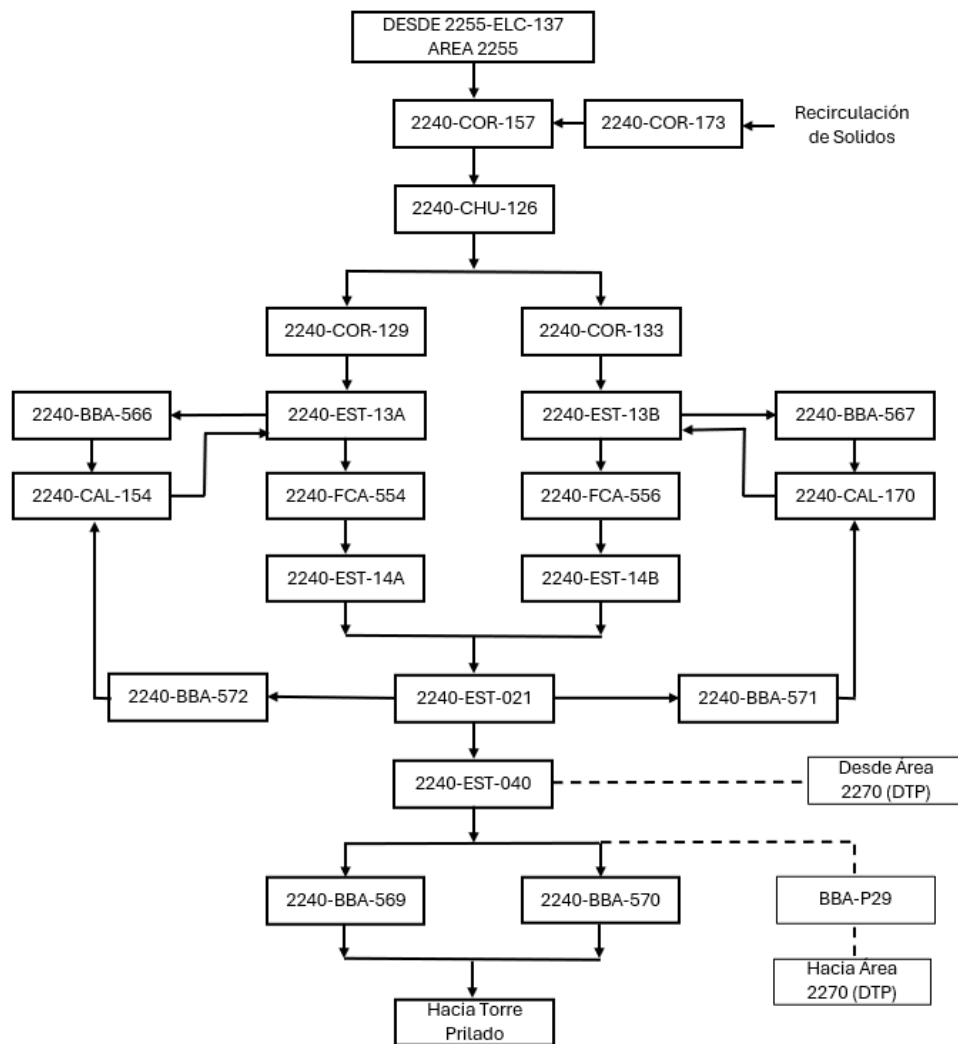
Equipos área Fusión.

Equipos	Descripción
2240-COR-157	Correa
2240-COR-173	Correa
2240-CHU-126	Chute
2240-COR-129	Correa
2240-EST-13A	Estanque
2240-FCA-554	Filtro
2240-EST-14A	Estanque
2240-BBA-572	Bomba
2240-CAL-154	Calentador
2240-BBA-566	Bomba
2240-COR-133	Correa
2240-EST-13B	Estanque
2240-FCA-556	Filtro
2240-EST-14B	Estanque
2240-BBA-571	Bomba
2240-CAL-170	Calentador
2240-BBA-567	Bomba
2240-EST-021	Estanque
2240-EST-040	Estanque
2240-BBA-569	Bomba
2240-BBA-570	Bomba

Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 2

Diagrama de procesos área 2240.



Nota. El diagrama representa la secuencia operativa del sistema del área 2240, incluyendo la recepción de material desde el área 2255, la distribución hacia las líneas paralelas de equipos (correas, chutes, estanques, bombas y calentadores), los lazos de recirculación de sólidos y la descarga final hacia la torre de Prilado y el área 2270 (DTP).

Fuente. Elaboración propia.

El proceso productivo mostrado en el diagrama corresponde a una configuración de tipo serie-paralelo, donde el flujo proveniente del área 2255 (equipo 2255-ELC-137) se divide hacia los equipos 2240-COR-157 y 2240-COR-173, los cuales presentan un circuito de recirculación de sólidos que converge en el equipo 2240-CHU-126. A partir de esta etapa,

el sistema se bifurca en dos líneas paralelas principales conformadas por las COR-129 y COR-133, cada una con sus respectivos trenes de equipos asociados (EST, FCA, CAL y BBA), que operan de manera redundante para mantener la continuidad del proceso. Posteriormente, ambas líneas confluyen en los equipos BBA-572 y BBA-571, conectados en serie hacia la etapa final del proceso, donde el flujo se dirige a los equipos BBA-569 y BBA-570, antes de su envío hacia la Torre Prilado o el área 2270 (DTP). En conjunto, el diagrama evidencia un sistema de procesamiento secuencial con ramas paralelas interconectadas, representando una operación integrada entre las áreas 2255, 2240 y 2270.

- Área 2270: Planta de Descomposición Térmica.

Tabla 3

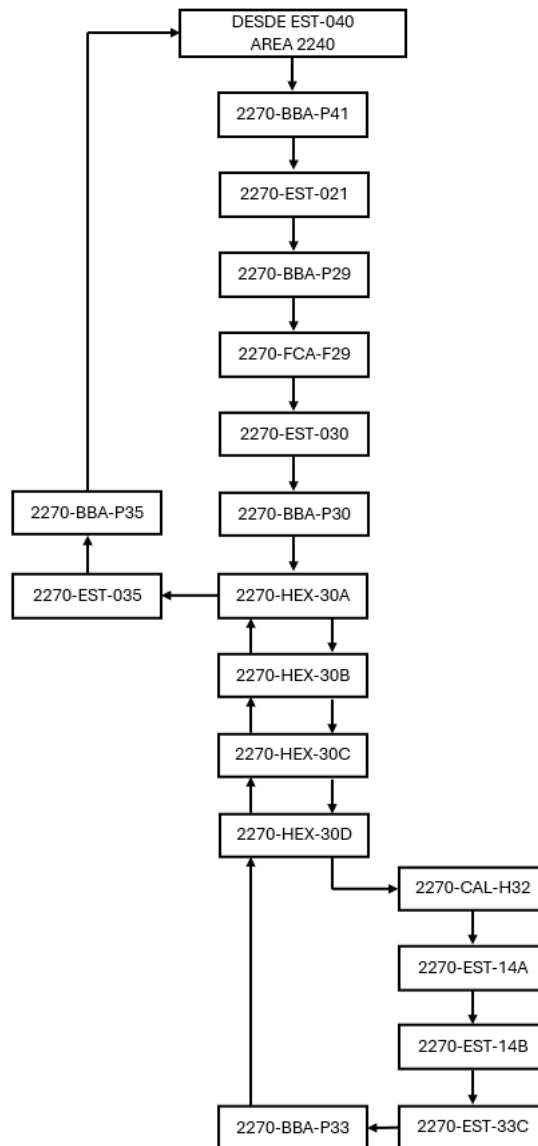
Equipos área DTP.

Equipos	Descripción
2270-BBA-P41	Bomba
2270-EST-021	Estanque
2270-BBA-P29	Bomba
2270-FCA-F29	Filtro
2270-EST-030	Estanque
2270-BBA-P30	Bomba
2270-HEX-30A	Intercambiador de calor
2270-HEX-30B	Intercambiador de calor
2270-HEX-30C	Intercambiador de calor
2270-HEX-30D	Intercambiador de calor
2270-CAL-H32	Calentador
2270-EST-14A	Estanque
2270-EST-14B	Estanque
2270-EST-33C	Estanque
2270-BBA-P33	Bomba
2270-EST-035	Estanque
2270-BBA-P35	Bomba

Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 3

Diagrama de procesos área 2270.



Nota. El diagrama muestra la secuencia operativa del sistema del área 2270 (DTP), desde la recepción de material proveniente del estanque EST-040 del área 2240, su conducción a través de estanques, bombas, intercambiadores de calor y calentadores, hasta el equipo crítico 2270-CAL-H32 y las etapas posteriores de almacenamiento y recirculación del proceso.

Fuente. Elaboración propia.

El proceso productivo mostrado en el diagrama corresponde a una configuración principalmente en serie, donde el flujo se inicia desde el EST-040 del área 2240, avanzando

secuencialmente por los equipos BBA-P41, EST-021, BBA-P29, FCA-F29, EST-030 y BBA-P30, hasta ingresar al tren de intercambiadores de calor HEX-30A, HEX-30B, HEX-30C y HEX-30D, dispuestos en serie con el propósito de elevar progresivamente la temperatura del proceso antes de su ingreso al calefactor CAL-H32 y, posteriormente, enfriar el producto de salida de CAL-H32 antes de enviarlo a Prilado. En condiciones normales, los intercambiadores operan secuencialmente; sin embargo, cuando alguno se encuentra fuera de servicio, es posible realizar un Bypass, lo que permite continuar el proceso con una leve disminución en la eficiencia térmica, compensada mediante un incremento de temperatura en el CAL-H32.

El flujo operativo continúa desde el CAL-H32 hacia los estanques EST-14A, EST-14B y EST-33C, los cuales actúan como recipientes de residencia o estabilización térmica del producto. Desde estos estanques, el flujo se inyecta nuevamente al intercambiador HEX-30D, iniciando el circuito de intercambio térmico ascendente que recorre los HEX-30C, HEX-30B y HEX-30A, hasta llegar al EST-035, donde mediante la BBA-P35 el producto es retornado al sistema, completando así el ciclo térmico y de recirculación del área 2270.

- Área 2252: Torre de Prilado y Descarga de Sólidos

Tabla 4

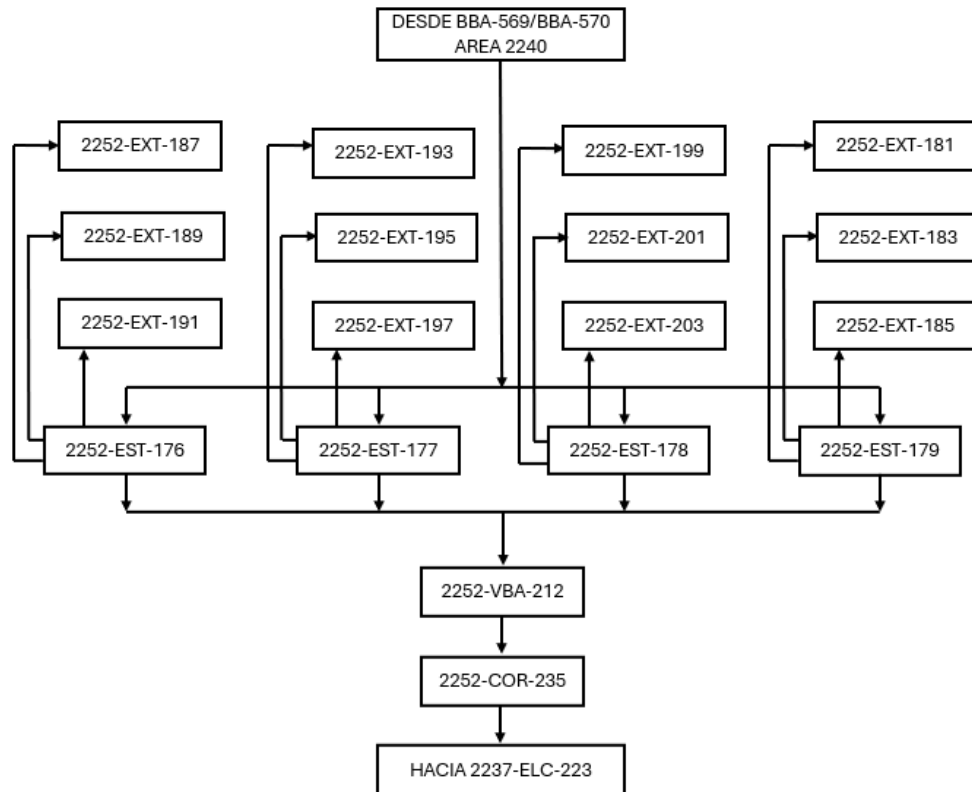
Equipos área torre de Prilado y descarga de sólidos.

Equipos	Descripción
2252-EST-176	Estanque
2252-EST-177	Estanque
2252-EST-178	Estanque
2252-EST-179	Estanque
2252-EXT-181	Extractor de aire
2252-EXT-183	Extractor de aire
2252-EXT-185	Extractor de aire
2252-EXT-187	Extractor de aire
2252-EXT-189	Extractor de aire
2252-EXT-191	Extractor de aire
2252-EXT-193	Extractor de aire
2252-EXT-195	Extractor de aire
2252-EXT-197	Extractor de aire
2252-EXT-199	Extractor de aire
2252-EXT-201	Extractor de aire
2252-EXT-203	Extractor de aire
2252-VBA-212	Vibrador Skako

Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 4

Diagrama de procesos área 2252.



Nota. El diagrama representa la secuencia operativa del sistema del área 2252, desde la recepción de material proveniente de las bombas BBA-569 y BBA-570 del área 2240, su distribución hacia los distintos equipos de extracción (EXT), la acumulación en los estanques intermedios (EST), y la posterior conducción a través del vibrador Skako VBA-212 y la correa COR-235, hasta la descarga hacia el área 2237 (ELC-223).

Fuente. Elaboración propia.

El proceso productivo mostrado en el diagrama corresponde a una configuración de tipo paralelo-serie, en la cual el flujo proveniente de las bombas BBA-569/BBA-570 del área 2240 se distribuye hacia cuatro trenes de enfriamiento dispuestos en paralelo, cada uno asociado a su respectivo estanque de descarga. El tren 1 está compuesto por los EXT-187, EXT-189 y EXT-191, asociados al EST-176; el tren 2 por los EXT-193, EXT-195 y EXT-197,

asociados al EST-177; el tren 3 por los EXT-199, EXT-201 y EXT-203, asociados al EST-178; y el tren 4 por los EXT-181, EXT-183 y EXT-185, vinculados al EST-179.

En este sistema, los EXT corresponden a equipos de ventilación o enfriamiento que impulsan aire hacia los estanques EST, con el objetivo de reducir la temperatura del producto sólido (prill) contenido en ellos. El producto no circula por los EXT, sino que se deposita directamente en los EST, donde recibe el flujo de aire de enfriamiento proveniente de cada tren. Posteriormente, el material enfriado es descargado desde los EST hacia el VBA-212, un vibrador encargado de trasladar el prill hacia la COR-235, desde donde finalmente el flujo continúa hacia el ELC-223 del área 2237, completando la etapa de transferencia del producto sólido.

- Área 2237: Granulado Prilado.

Tabla 5

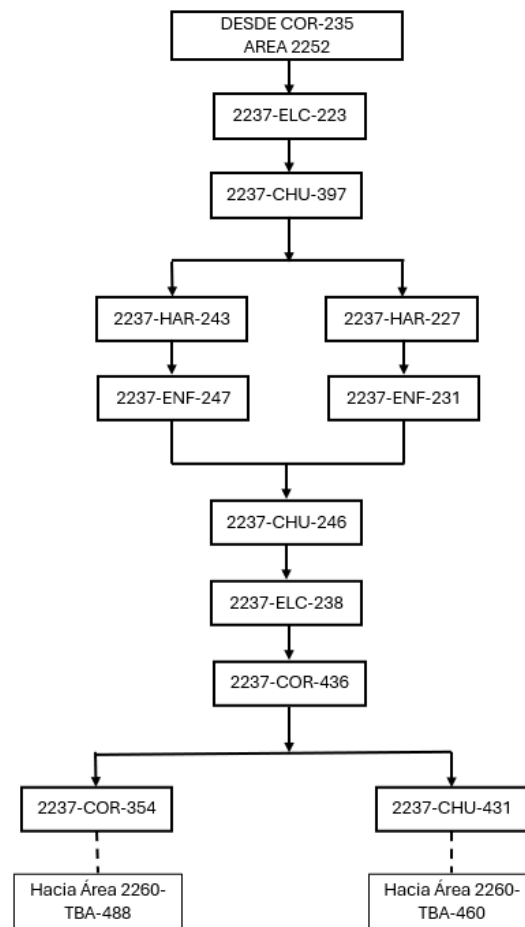
Equipos área granulado Prilado.

Equipos	Descripción
2237-ELC-223	Elevador de capachos
2237-CHU-397	Chute
2237-HAR-243	Harnero rotatorio
2237-ENF-247	Enfriador de aire
2237-HAR-227	Harnero rotatorio
2237-ENF-231	Enfriador de aire
2237-CHU-246	Chute
2237-ELC-238	Elevador de capachos
2237-COR-436	Correa
2237-COR-354	Correa
2237-CHU-431	Chute

Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 5

Diagrama de procesos área 2237.



Nota. El diagrama muestra la secuencia operativa del sistema del área 2237, desde la recepción de material proveniente de la correa COR-235 del área 2252, su paso por equipos de elevación y chutes, la distribución en líneas paralelas de harneros y enfriadores, y la posterior unificación del flujo para su transporte final hacia el área 2260, a través de las correas y chutes asociados.

Fuente. Elaboración propia.

El proceso productivo mostrado en el diagrama corresponde a una configuración de tipo serie-paralelo, donde el flujo proveniente de la COR-235 del área 2252 ingresa al ELC-223 y continúa en serie hacia el CHU-397, punto en el que se divide en dos líneas paralelas de tratamiento: una compuesta por los equipos HAR-243 y ENF-247, y otra por HAR-227 y ENF-231. Ambas líneas operan simultáneamente y confluyen en el CHU-246, desde donde el flujo avanza hacia el ELC-238 y posteriormente a la COR-436.

La COR-436 cumple una función reversible, actuando como punto de distribución que divide o redirige la carga hacia dos rutas alternativas: una hacia la COR-354, que alimenta el área 2260-TBA-488, y otra hacia el CHU-431, que conduce el flujo hacia el área 2260-TBA-460. En este tramo final, uno de los trenes opera como respaldo del otro, permitiendo la continuidad del proceso en caso de indisponibilidad de una de las líneas. En conjunto, el sistema presenta una configuración mixta serie-paralelo con derivación reversible, que asegura la flexibilidad operativa entre las áreas 2237 y 2260.

- Área 2260: Almacenamiento, Envasado y Despacho.

Tabla 6

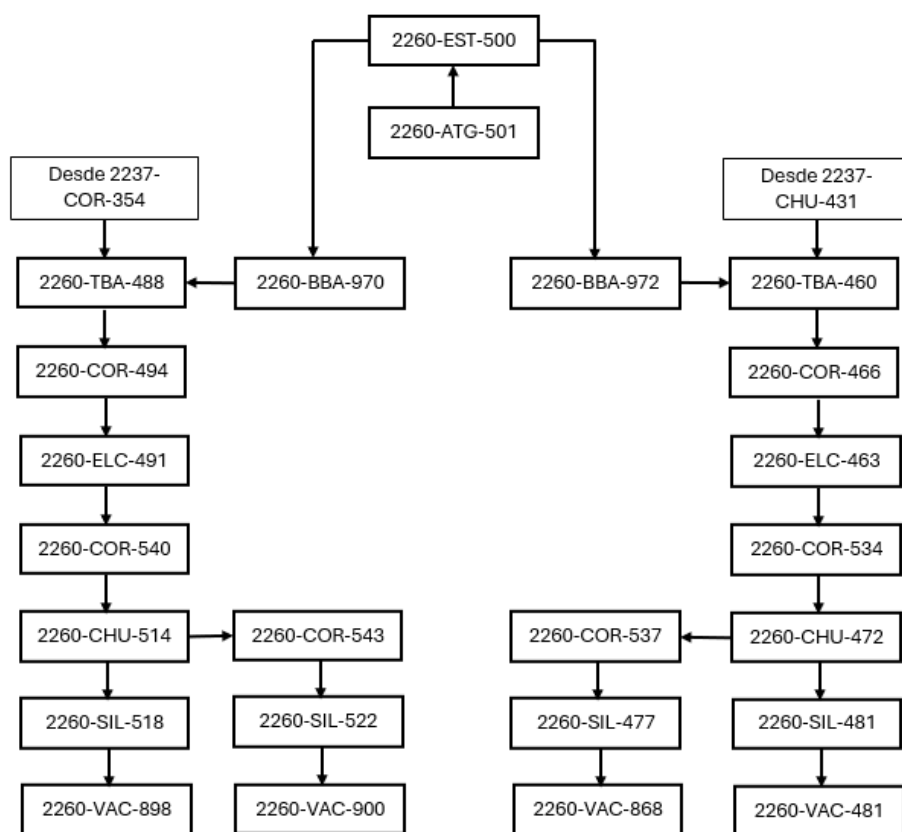
Equipos área almacenamiento, envasado y despacho.

Equipos	Descripción
2260-ATG-501	Agitador
2260-EST-500	Estanque
2260-BBA-970	Bomba
2260-TBA-488	Tambor
2260-COR-494	Correa
2260-ELC-491	Elevador de capachos
2260-COR-540	Correa
2260-CHU-514	Chute
2260-BBA-972	Bomba
2260-TBA-460	Tambor
2260-COR-466	Correa
2260-ELC-463	Elevador de capachos
2260-COR-534	Correa
2260-CHU-472	Chute
2260-SIL-518	Silo
2260-VAC-898	Válvula mecánica
2260-COR-543	Correa
2260-SIL-522	Silo
2260-VAC-900	Válvula mecánica
2260-SIL-481	Silo
2260-VAC-481	Válvula mecánica
2260-COR-537	Correa
2260-SIL-477	Silo
2260-VAC-868	Válvula mecánica

Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 6

Diagrama de procesos área 2260.



Nota. El diagrama muestra la secuencia operativa del sistema del área 2260, desde la recepción de material proveniente del área 2237 a través de las correas COR-354 y el chute CHU-431, su distribución hacia las líneas paralelas de equipos de transporte, chutes, silos y válvulas de descarga, así como la integración del aditivo mediante los estanques y bombas asociadas (EST-500, ATG-501, BBA-970 y BBA-972), hasta las etapas finales del proceso.

Fuente. Elaboración propia.

En la primera línea, el material proveniente de la COR-354 ingresa al TBA-488, donde se mezcla con un aditivo dosificado desde la BBA-970, el cual recibe su alimentación desde el EST-500 a través del ATG-501. Tras la etapa de mezcla, el producto continúa en serie hacia la COR-494, luego al ELC-491, posteriormente a la COR-540 y finalmente al CHU-514. En este punto, el flujo se divide hacia el SIL-518 o hacia la COR-543, la cual descarga en el SIL-522. El cambio entre silos se realiza en función del nivel de llenado, permitiendo la operación alternada de almacenamiento. Desde cada silo, el producto es descargado

mediante los equipos VAC-898 y VAC-900, que cumplen la función de descarga final hacia camiones para despacho o transferencia.

De manera equivalente, en la segunda línea el flujo proveniente de la CHU-431 ingresa al TBA-460, donde se mezcla con aditivo suministrado desde la BBA-972, igualmente alimentada desde el EST-500. Luego, el producto avanza por la COR-466, el ELC-463, la COR-534 y el CHU-472, desde donde se deriva hacia el SIL-477 o hacia la COR-537, que descarga en el SIL-481. En esta línea también se alterna el uso de silos según su nivel de llenado. Finalmente, las unidades VAC-868 y VAC-481 permiten la descarga del producto hacia camiones, completando el ciclo operativo.

En conjunto, el sistema del área 2260 presenta una configuración mixta paralelo-serie, donde cada tren de proceso ejecuta las mismas etapas de mezclado, transporte, enfriamiento, almacenamiento y descarga, integradas bajo un esquema de funcionamiento alternado que garantiza continuidad operativa y control de flujo entre las áreas 2237 y 2260.

8.2. Cálculo de los indicadores de confiabilidad básica de los equipos

Se realiza el cálculo de confiabilidad de los equipos utilizando la Fórmula (1): “Disponibilidad Esperada” y el historial de fallas año 2024 y un proyectado de operación de 6000h al año, este cálculo se realizó por áreas productivas y equipos respectivos.

En todas las tablas de disponibilidad presentadas en el Capítulo, para aquellos equipos que no registraron fallas durante el período de análisis correspondiente al año 2024, no se realiza el cálculo del indicador MTBF. Conforme al criterio metodológico adoptado en el análisis de confiabilidad, en estos casos se considera que la disponibilidad esperada a la falla es igual al 100%, dado que no existe evidencia empírica de eventos de detención atribuibles al equipo en el período evaluado. Este criterio se aplica de manera uniforme a todos los equipos y áreas analizadas, asegurando consistencia en la evaluación de la disponibilidad individual y de los subsistemas.

- Área 2255: Alimentación y Secado de Nitratos.

Tabla 7

Disponibilidad esperada por equipos en el área 2255.

Equipos	MTTR (h)	MTBF (h)	Ai (%)	Ai sub (%)
2255-TOL-027	-	-	100,00%	100,00%
2255-COR-031	-	-	100,00%	
2255-TOL-035	-	-	100,00%	100,00%
2255-COR-039	-	-	100,00%	
2255-COR-028	1,00	5999,00	99,98%	99,98%
2255-COR-046	1,00	5999,00	99,98%	99,98%
2255-VBA-042	-	-	100,00%	100,00%
2255-CHU-378	-	-	100,00%	100,00%
2255-COR-056	2,00	5998,00	99,97%	99,97%
2255-SER-050	1,78	351,16	99,50%	99,50%
2255-COR-087	1,88	1498,13	99,88%	99,88%
2255-COR-100	-	-	100,00%	100,00%
2255-COR-110	-	-	100,00%	100,00%
2255-ELC-137	2,66	664,01	99,60%	99,60%

Fuente. Elaboración propia.

Donde:

Ai: Es disponibilidad esperada

El sistema tiene como función principal la recepción, transporte, alimentación y secado de nitratos, constituyendo una etapa crítica dentro del proceso productivo, ya que asegura la continuidad operacional del flujo de material hacia las etapas posteriores.

Durante el período de evaluación, el área presentó una disponibilidad global de 99,91 %, valor que refleja un alto nivel de desempeño operacional, aunque con leves pérdidas asociadas a fallas puntuales en algunos equipos secundarios.

El análisis individual de los equipos muestra que sobre el 70 % de los equipos mantiene disponibilidades superiores al 99,9 %, lo cual evidencia una efectiva estrategia de mantenimiento preventivo y correctivo oportuno, garantizando la continuidad del proceso. De acuerdo con los principios de ingeniería de la confiabilidad descritos por Arata y Arata (2010), este comportamiento refleja un adecuado equilibrio entre la frecuencia de fallas (MTBF) y los tiempos medios de reparación (MTTR), parámetros que determinan la disponibilidad y estabilidad operativa de los sistemas industriales.

El comportamiento general del área es estable y confiable, sustentado en altos valores de MTBF y bajos MTTR, lo que indica una rápida capacidad de recuperación frente a eventos de detención. Según el modelo de gestión de mantenimiento basado en confiabilidad propuesto por Crespo, Stegmaier, Barberá y Viveros (2012), el sistema se encuentra en una etapa de control y optimización, donde la gestión debe concentrarse en el monitoreo predictivo, la eliminación de fallas recurrentes y la mejora continua de los activos críticos.

- Área 2240: Fusión.

Tabla 8

Disponibilidad esperada por equipos en el área 2240.

Equipos	MTTR (h)	MTBF (h)	Ai (%)	Ai sub (%)
2240-COR-157	2,00	5998,00	99,97%	99,97%
2240-COR-173	3,10	1496,90	99,79%	99,79%
2240-CHU-126	-	-	100,00%	100,00%
2240-COR-129	-	-	100,00%	96,11%
2240-EST-13A	-	-	100,00%	
2240-FCA-554	-	-	100,00%	
2240-EST-14A	-	-	100,00%	
2240-BBA-572	-	-	100,00%	
2240-CAL-154	3,76	93,01	96,11%	
2240-BBA-566	-	-	100,00%	98,68%
2240-COR-133	-	-	100,00%	
2240-EST-13B	-	-	100,00%	
2240-FCA-556	-	-	100,00%	
2240-EST-14B	-	-	100,00%	
2240-BBA-571	-	-	100,00%	
2240-CAL-170	2,78	219,45	98,75%	
2240-BBA-567	2,00	2998,00	99,93%	100,00%
2240-EST-021	-	-	100,00%	
2240-EST-040	-	-	100,00%	
2240-BBA-569	-	-	100,00%	
2240-BBA-570	-	-	100,00%	100,00%

Fuente. Elaboración propia.

El sistema correspondiente al Área 2240, tiene como función principal de recibir, fundir y homogenización de los productos sólidos provenientes de etapas anteriores, asegurando la continuidad térmica y operacional del flujo de material hacia los procesos posteriores.

Este sistema presenta una alta criticidad operativa, dado que cualquier interrupción impacta directamente la eficiencia térmica del proceso y la calidad del producto final.

Durante el período de evaluación, el área alcanzó una disponibilidad global de 99,71 %, reflejando un elevado desempeño operacional y una gestión de mantenimiento efectiva, caracterizada por la implementación de estrategias preventivas y correctivas oportunas. Las leves pérdidas registradas se asocian principalmente a eventos de detención en equipos de fusión, específicamente en los calentadores (bertrams) CAL-154 y CAL-170, los cuales concentraron la mayor frecuencia de fallas del sistema.

En este contexto, los CAL-154 (96,11 % Ai) y CAL-170 (98,68 % Ai) presentan menores niveles de disponibilidad, asociados a condiciones térmicas extremas o desgaste de componentes internos. Sin embargo, debido a que ambos equipos se encuentran instalados en configuración paralela, cuando uno de ellos presenta una falla o se encuentra en mantenimiento, el otro mantiene la operación del sistema a menor capacidad, evitando la detención total del proceso. Esta condición provoca que la producción disminuya temporalmente, pero la disponibilidad total del sistema no se vea comprometida, manteniéndose dentro de rangos altos y estables. En consecuencia, la redundancia funcional entre los calentadores contribuye positivamente al aumento de la disponibilidad global del área.

Finalmente, según el modelo de gestión avanzada de mantenimiento basado en confiabilidad propuesto por Crespo, Stegmaier, Barberá y Viveros (2012), el sistema se encuentra en una etapa de control y optimización, donde la gestión debe enfocarse en fortalecer las estrategias predictivas (CBM), realizar análisis de causa raíz (RCA) sobre los activos críticos y consolidar un plan de mantenimiento orientado al riesgo que permita mejorar la confiabilidad de los calentadores en paralelo y garantizar la continuidad térmica del proceso de fusión.

- Área 2270: Planta de Descomposición Térmica.

Tabla 9

Disponibilidad esperada por equipos en el área 2270.

Equipos	MTTR (h)	MTBF (h)	Ai (%)	Ai sub (%)
2270-BBA-P41	2,50	2997,50	99,92%	99,92%
2270-EST-021	-	-	100,00%	100,00%
2270-BBA-P29	-	-	100,00%	100,00%

2270-FCA-F29	-	-	100,00%	100,00%
2270-EST-030	-	-	100,00%	100,00%
2270-BBA-P30	4,00	5996,00	99,93%	99,93%
2270-HEX-30A	3,00	5997,00	99,95%	99,95%
2270-HEX-30B	4,00	5996,00	99,93%	99,93%
2270-HEX-30C	-	-	100,00%	100,00%
2270-HEX-30D	-	-	100,00%	100,00%
2270-CAL-H32	2,86	81,65	96,62%	96,62%
2270-EST-14A	-	-	100,00%	100,00%
2270-EST-14B	-	-	100,00%	100,00%
2270-EST-33C	9,00	2991,00	99,70%	99,70%
2270-BBA-P33	2,50	2997,50	99,92%	99,92%
2270-EST-035	9,00	5991,00	99,85%	99,85%
2270-BBA-P35	-	-	100,00%	100,00%

Fuente. Elaboración propia.

La Planta de Descomposición Térmica tiene como función principal la transformación térmica de compuestos intermedios mediante procesos controlados de alta temperatura, asegurando la obtención de productos con la pureza y características físico-químicas requeridas para las etapas posteriores del proceso productivo. Debido a las condiciones extremas de operación y a la naturaleza continua del proceso, esta área posee una alta criticidad operacional, ya que cualquier interrupción impacta directamente en la estabilidad térmica, el rendimiento energético y la calidad final del producto.

Durante el período de evaluación, el área presentó una disponibilidad global de 95,84 %, valor que, si bien mantiene la operación dentro de márgenes aceptables, evidencia la existencia de equipos con incidencias de falla relevantes que afectan la continuidad operacional del sistema. El 80 % de los equipos mantiene disponibilidades superiores al 99,9 %, destacando estaciones de transferencia, bombas y cambiadores de calor (HEX-30C y HEX-30D) con MTBF de 6.504 horas y MTTR nulo, lo que indica un comportamiento altamente confiable. Sin embargo, se identificaron equipos críticos con baja confiabilidad relativa, los cuales concentran las principales pérdidas del área.

Entre estos, el CAL-H32 (96,62 % Ai) y la bomba BBA-P33 (98,85 % Ai) presentan MTBF reducidos (88,75 h y 238 h, respectivamente) y tiempos medios de reparación elevados, lo que sugiere fallas térmicas o mecánicas recurrentes asociadas a esfuerzos de operación, desgaste de componentes o deficiencias en los sistemas de control de temperatura y presión. De igual forma, el EST-33C (99,72 % Ai) evidencia detenciones intermitentes que, aunque de baja frecuencia, contribuyen a la disminución de la disponibilidad total del área.

De acuerdo con los principios de ingeniería de la confiabilidad propuestos por Arata y Arata (2013), el equilibrio entre la frecuencia de fallas (MTBF) y el tiempo medio de reparación (MTTR) constituye el principal indicador del desempeño de los sistemas industriales, siendo esencial mantener bajos tiempos de intervención para maximizar la disponibilidad. En este contexto, las pérdidas observadas en los equipos CAL-H32 y BBA-P33 se asocian a desequilibrios entre la mantenibilidad y la severidad de las condiciones térmicas, evidenciando la necesidad de optimizar los intervalos de mantenimiento y los procedimientos de reparación para reducir la indisponibilidad operativa.

El análisis general del sistema muestra que los activos principales mantienen un desempeño confiable, mientras que las pérdidas de disponibilidad se concentran en equipos de alta exigencia térmica y rotacional, característicos de la etapa de descomposición. Según el modelo de gestión de mantenimiento basado en confiabilidad propuesto por Crespo, Stegmaier, Barberá y Viveros (2012), el área se encuentra en una fase de mejora y optimización, donde la gestión debe enfocarse en fortalecer el mantenimiento predictivo (CBM), incorporar análisis de causa raíz (RCA) sobre los equipos críticos (CAL-H32, BBA-P33 y EST-33C) y revisar las estrategias de planificación preventiva, priorizando la reducción de tiempos de reparación y la mitigación de fallas repetitivas.

- Área 2252: Torre de Prilado y Descarga de Sólidos

Tabla 10

Disponibilidad esperada por equipos en el área 2252.

Equipos	MTTR (h)	MTBF (h)	Ai (%)	Ai sub (%)
2252-EST-176	1,50	1498,50	99,90%	100,00%
2252-EST-177	2,25	1497,75	99,85%	
2252-EST-178	1,68	1998,32	99,92%	
2252-EST-179	1,68	2166,32	99,92%	
2252-EXT-181	-	-	100,00%	100,00%
2252-EXT-183	-	-	100,00%	100,00%
2252-EXT-185	-	-	100,00%	100,00%
2252-EXT-187	-	-	100,00%	100,00%
2252-EXT-189	-	-	100,00%	100,00%
2252-EXT-191	-	-	100,00%	100,00%

2252-EXT-193	-	-	100,00%	100,00%
2252-EXT-195	-	-	100,00%	100,00%
2252-EXT-197	-	-	100,00%	100,00%
2252-EXT-199	-	-	100,00%	100,00%
2252-EXT-201	-	-	100,00%	100,00%
2252-EXT-203	-	-	100,00%	100,00%
2252-VBA-212	3,09	1996,91	99,85%	99,85%
2252-COR-235	-	-	100,00%	100,00%

Fuente. Elaboración propia.

Esta área tiene como función principal la solidificación del producto fundido proveniente del área de fusión, el cual ingresa en estado líquido y es sometido a un proceso similar al efecto ducha y enfriamiento controlado dentro de la torre de Prilado. Durante este proceso, el material fundido se fragmenta en pequeñas esferas sólidas denominadas prill, que constituyen la forma final del producto sólido. Posteriormente, este material es descargado y transferido hacia las etapas de transporte o almacenamiento, asegurando la continuidad operacional del flujo productivo.

Durante el período de evaluación, el área alcanzó una disponibilidad global de 99,85%, lo que refleja un nivel de confiabilidad operacional muy alto y una gestión de mantenimiento consolidada. El 93 % de los equipos, principalmente estanques y extractores, registraron disponibilidades del 100 %, evidenciando una efectiva planificación de mantenimiento preventivo y correctivo.

El único equipo con una leve desviación corresponde a un transportador vibratorio VBA-212, con una disponibilidad de 99,85 %, asociada a fallas menores y de rápida reparación (MTTR = 3,09 h), que no afectan la continuidad del proceso. En términos generales, el área opera de forma estable, con baja frecuencia de fallas y alta mantenibilidad, garantizando la confiabilidad del sistema global.

De acuerdo con el modelo de gestión avanzada de mantenimiento basado en confiabilidad propuesto por Crespo, Stegmaier, Barberá y Viveros (2012), el área se encuentra en una fase de control y optimización, donde la gestión debe enfocarse en mantener el nivel actual de confiabilidad operacional, reforzando las actividades de inspección y monitoreo de condición para conservar su desempeño sostenido y prevenir desviaciones futuras.

Ilustración 7

Referencia de Prill.



Nota. Adaptado de Proceso de Prill, por SQM (2007).

- Área 2237: Granulado Prilado.

Tabla 11

Disponibilidad esperada por equipos en el área 2237

Equipos	MTTR (h)	MTBF (h)	Ai (%)	Ai sub (%)
2237-ELC-223	-	-	100,00%	100,00%
2237-CHU-397	-	-	100,00%	100,00%
2237-HAR-243	3,40	1196,60	99,72%	100,00%
2237-ENF-247	-	-	100,00%	
2237-HAR-227	1,95	1498,05	99,87%	100,00%
2237-ENF-231	2,00	5998,00	99,97%	
2237-CHU-246	-	-	100,00%	100,00%
2237-ELC-238	2,33	5997,67	99,96%	99,96%
2237-COR-436	2,13	1997,87	99,89%	99,89%
2237-COR-354	2,76	1197,24	99,770%	100,00%
2237-CHU-431	-	-	100,000%	

Fuente. Elaboración propia

Granulado Prilado tiene como función principal la formación, enfriamiento y transporte del producto sólido granulado (prill) proveniente del proceso de solidificación en la torre de Prilado (Área 2252). En esta etapa, los prills se someten a un proceso de enfriamiento controlado, clasificación y transferencia, asegurando que el material cumpla con las condiciones físicas y granulométricas requeridas para su posterior almacenamiento o

despacho. Este proceso es esencial para mantener la calidad final del producto y garantizar la continuidad operacional del circuito sólido.

Durante el período de evaluación, el área alcanzó una disponibilidad global de 99,85 %, reflejando un alto nivel de desempeño y estabilidad operacional. Todos los equipos registran disponibilidades iguales o superiores al 99,9 %, lo que demuestra la efectividad de la gestión de mantenimiento preventivo y correctivo implementada.

Los únicos activos que presentan leves desviaciones corresponden a los harneros HAR-243 (99,72 %) y HAR-227 (99,87 %), los cuales registran mayores tiempos medios de reparación (MTTR de 3,40 h y 1,95 h) asociados a ajustes mecánicos o limpiezas periódicas por acumulación de material. De igual forma, las correas COR-354 y COR-436 muestran MTBF levemente inferiores al promedio general, lo que sugiere paradas menores por mantenimiento rutinario o ajustes de tensión, sin impacto significativo en la disponibilidad global.

En términos generales, el área presenta una operación estable y confiable, caracterizada por baja frecuencia de fallas y rápida capacidad de recuperación. Esto posiciona al sistema dentro de una fase de control operacional, donde el mantenimiento se encuentra plenamente integrado a la operación, con resultados consistentes y sostenidos en el tiempo.

- Área 2260: Almacenamiento, Envasado y Despacho.

Tabla 12

Disponibilidad esperada por equipos en el área 2260.

Equipos	MTTR (h)	MTBF (h)	Ai (%)	Ai sub (%)
2260-ATG-501	-	-	100,00%	100,00%
2260-EST-500	-	-	100,00%	
2260-BBA-970	-	-	100,00%	99,83%
2260-TBA-488	-	-	100,00%	
2260-COR-494	6,00	5994,00	99,90%	
2260-ELC-491	3,00	5997,00	99,95%	
2260-COR-540	1,00	5999,00	99,98%	
2260-CHU-514	-	-	100,00%	99,88%
2260-BBA-972	-	-	100,00%	
2260-TBA-460	-	-	100,00%	
2260-COR-466	1,50	5998,50	99,98%	
2260-ELC-463	-	-	100,00%	
2260-COR-534	2,85	2997,15	99,91%	
2260-CHU-472	-	-	100,00%	

2260-SIL-518	-	-	100,00%	100,00%
2260-VAC-898	-	-	100,00%	
2260-COR-543	-	-	100,00%	100,00%
2260-SIL-522	-	-	100,00%	
2260-VAC-900	-	-	100,00%	
2260-SIL-481	1,50	5998,50	99,98%	99,98%
2260-VAC-481	-	-	100,00%	
2260-COR-537	-	-	100,00%	99,89%
2260-SIL-477	3,45	2996,55	99,89%	
2260-VAC-868	-	-	100,00%	

Fuente. Elaboración propia.

Este sistema tiene como función principal la recepción, acumulación y transferencia del producto sólido hacia las etapas de envasado y expedición final. En esta área, el material proveniente de la torre de Prilado es almacenado en cuatro silos principales (SIL-518, SIL-522, SIL-477 y SIL-481), desde donde se transfiere mediante correas transportadoras, tambores (TBA), bombas (BBA) y válvulas de descarga (VAC) hacia las estaciones de despacho y carga del producto terminado.

Estos silos, junto con sus válvulas de descarga, operan en configuración paralela, permitiendo mantener la continuidad del flujo de material incluso ante la detención de uno o más equipos. Gracias a esta redundancia funcional, el sistema puede redistribuir la carga entre los silos activos, lo que evita interrupciones del proceso y contribuye significativamente a mantener una alta disponibilidad operacional.

Durante el período de evaluación, el área presentó una disponibilidad global del 100%, reflejando un nivel de desempeño sobresaliente y una gestión de mantenimiento altamente efectiva. La mayoría de los equipos correas, bombas, silos y válvulas, mantuvieron disponibilidades individuales iguales o superiores al 99,9%, sin evidenciar detenciones críticas ni fallas que comprometieran la continuidad operativa del sistema.

Las leves desviaciones observadas en equipos como las correas COR-494, COR-534 y COR-537 y los silos SIL-477 y SIL-481 corresponden a intervenciones programadas o ajustes menores, que no afectaron la producción ni el proceso de despacho. Este comportamiento evidencia un nivel de madurez técnica avanzado, donde la gestión de mantenimiento se orienta al control de condición y la prevención proactiva de fallas, más que a la reparación reactiva.

8.3. Cálculo de la Disponibilidad Física de los activos, utilizando datos históricos reales de operación y detenciones

La disponibilidad física de los activos constituye un indicador clave para evaluar la continuidad funcional real del proceso productivo, ya que refleja el desempeño efectivo de los equipos durante la operación, considerando las horas reales de funcionamiento y las detenciones registradas en el período analizado. A diferencia de la disponibilidad esperada, basada en parámetros estadísticos, la disponibilidad física se obtiene directamente a partir de datos históricos reales, permitiendo una evaluación objetiva del comportamiento operacional de los activos.

En el presente estudio, la disponibilidad física fue calculada utilizando los registros históricos de operación y detenciones correspondientes al año 2024, obtenidos desde la base de datos de Planta Prilado CS. Previamente, dicha información fue sometida a un proceso de revisión y depuración, debido a la existencia de registros incompletos, inconsistencias y eventos mal reportados, con el fin de asegurar la consistencia y confiabilidad de los resultados.

El cálculo de disponibilidad física se realiza utilizando la Fórmula (2): “Disponibilidad física” y se realiza por áreas operativas, las cuales se detallan a continuación.

Para aquellos equipos que no registraron eventos de detención durante el período analizado (TFS = 0), no se estimaron indicadores estadísticos de confiabilidad como MTBF o MTTR, dado que no existen fallas observadas que permitan su cálculo. En estos casos, se consideró una disponibilidad física real del 100 %, evitando asignar artificialmente una frecuencia de falla no respaldada por los datos históricos disponibles.

- Área 2255: Alimentación y Secado de Nitratos.

Tabla 13

Disponibilidad física por equipos en el área 2255.

Equipos	T op (h)	TFS (h)	Ai real (%)	Ai real sub (%)
2255-TOL-027	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2255-COR-031	6504,00	0,00	100,00%	
2255-TOL-035	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2255-COR-039	6504,00	0,00	100,00%	
2255-COR-028	6504,00	1,00	99,98%	99,98%

2255-COR-046	6504,00	1,00	99,98%	99,98%
2255-ALM-043	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2255-VBA-042	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2255-CHU-378	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2255-COR-056	6504,00	2,00	99,97%	99,97%
2255-SER-050	6504,00	30,22	99,54%	99,54%
2255-COR-087	6504,00	7,50	99,88%	99,88%
2255-COR-100	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2255-COR-110	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2255-ELC-137	6504,00	23,92	99,63%	99,63%

Fuente. Elaboración propia.

Donde:

- T op : Tiempo Operativo
- TFS : Tiempo fuera de servicio
- Ai real : Disponibilidad física

La disponibilidad física real del Área 2255: Alimentación y Secado de Nitratos alcanzó un 99,00 %, lo que refleja un desempeño confiable y estable dentro de un proceso continuo. La mayoría de los equipos, como tolvas, correas transportadoras, alimentadores y válvulas de descarga operaron sin interrupciones, alcanzando disponibilidades cercanas al 100 %, lo que demuestra la efectividad del mantenimiento preventivo aplicado. Las pequeñas pérdidas se concentraron en los equipos SER-050 (99,54 %) y ELC-137 (99,63 %), cuyas fallas fueron menores y de corta duración, sin impacto relevante en la producción. En general, el área presenta una alta confiabilidad técnica y baja frecuencia de fallas, lo que permite mantener la continuidad del proceso de alimentación y secado con una eficiencia global sostenida.

- Área 2240: Fusión.

Tabla 14

Disponibilidad física por equipos en el área 2240.

Equipos	T op (h)	TFS (h)	Ai real (%)	Ai real sub (%)
2240-COR-157	6504,00	2,00	99,97%	99,97%
2240-COR-173	6504,00	12,40	99,81%	99,81%
2240-CHU-126	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2240-COR-129	6504,00	0,00	100,00%	96,54%

2240-EST-13A	6504,00	0,00	100,00%	
2240-FCA-554	6504,00	0,00	100,00%	
2240-EST-14A	6504,00	0,00	100,00%	
2240-BBA-572	6504,00	0,00	100,00%	
2240-CAL-154	6504,00	233,37	96,54%	
2240-BBA-566	6504,00	0,00	100,00%	
2240-COR-133	6504,00	0,00	100,00%	
2240-EST-13B	6504,00	0,00	100,00%	
2240-FCA-556	6504,00	0,00	100,00%	
2240-EST-14B	6504,00	0,00	100,00%	
2240-BBA-571	6504,00	0,00	100,00%	
2240-CAL-170	6504,00	74,97	98,86%	
2240-BBA-567	6504,00	4,00	99,94%	
2240-EST-021	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2240-EST-040	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2240-BBA-569	6504,00	0,00	100,00%	
2240-BBA-570	6504,00	0,00	100,00%	100,00%

Fuente. Elaboración propia.

La disponibilidad física real del Área 2240: Fusión alcanzó un 99,74 %, lo que evidencia una operación estable, confiable y con alto desempeño. La mayoría de los equipos, como las correas, bombas y estaciones de transferencia mantuvieron una disponibilidad del 100 %, asegurando la continuidad del proceso.

Las principales pérdidas se concentraron en los calentadores CAL-154 (96,54 %) y CAL-170 (98,86 %), expuestos a altas temperaturas y esfuerzos prolongados. No obstante, al operar en configuración paralela, una detención en uno de ellos no interrumpe la producción, lo que permite mantener una alta disponibilidad global del sistema.

En síntesis, el Área 2240 se encuentra en una etapa de control y optimización, con una confiabilidad consolidada y una gestión de mantenimiento eficiente, que garantizan la estabilidad y continuidad del proceso de fusión.

- Área 2270: Planta de Descomposición Térmica.

Tabla 15

Disponibilidad física por equipos en el área 2240.

Equipos	T op (h)	TFS (h)	Ai real (%)	Ai real sub (%)
2270-BBA-P41	6504,00	5,00	99,92%	99,92%
2270-EST-021	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2270-BBA-P29	6504,00	0,00	100,00%	100,00%

2270-FCA-F29	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2270-EST-030	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2270-BBA-P30	6504,00	4,00	99,94%	99,94%
2270-HEX-30A	6504,00	3,00	99,95%	99,95%
2270-HEX-30B	6504,00	4,00	99,94%	99,94%
2270-HEX-30C	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2270-HEX-30D	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2270-CAL-H32	6504,00	203,08	96,97%	96,97%
2270-EST-14A	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2270-EST-14B	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2270-EST-33C	6504,00	18,00	99,72%	99,72%
2270-BBA-P33	6504,00	5,00	99,92%	99,92%
2270-EST-035	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2270-BBA-P35	6504,00	9,00	99,86%	99,86%

Fuente. Elaboración propia.

La disponibilidad física real del Área 2270, correspondiente a la Planta de Descomposición Térmica, alcanzó un 96,26 %, reflejando un desempeño aceptable, pero con oportunidades de mejora. La mayoría de los equipos, como las bombas, estaciones de transferencia y cambiadores de calor, mantuvieron disponibilidades sobre el 99,9 %, evidenciando un funcionamiento confiable y una gestión de mantenimiento adecuada.

Las principales pérdidas se concentraron en el CAL-H32 (96,97 %), equipo sometido a altas temperaturas y esfuerzos continuos, lo que explica su mayor frecuencia de fallas e intervenciones. En menor medida, la bomba BBA-P35 y el estanque EST-33C registraron pequeñas desviaciones, sin un impacto relevante sobre la producción.

En general, el área mantiene un buen nivel de disponibilidad, aunque requiere reforzar las estrategias de mantenimiento predictivo y preventivo en los equipos térmicos para reducir los tiempos de reparación y alcanzar una mayor estabilidad operacional.

- Área 2252: Torre de Prilado y Descarga de Sólidos

Tabla 16

Disponibilidad física por equipos en el área 2252.

Equipos	T op (h)	TFS (h)	Ai real (%)	Ai real sub (%)
2252-EST-176	6504,00	6,00	99,91%	100,00%
2252-EST-177	6504,00	9,00	99,86%	
2252-EST-178	6504,00	3,00	99,95%	
2252-EST-179	6504,00	5,05	99,92%	

2252-EXT-181	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2252-EXT-183	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2252-EXT-185	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2252-EXT-187	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2252-EXT-189	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2252-EXT-191	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2252-EXT-193	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2252-EXT-195	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2252-EXT-197	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2252-EXT-199	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2252-EXT-201	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2252-EXT-203	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2252-VBA-212	6504,00	9,28	99,86%	99,86%
2252-COR-235	6504,00	0,00	100,00%	100,00%

Fuente. Elaboración propia.

La disponibilidad física real del Área 2252, correspondiente a la Torre de Prilado y Descarga de Sólidos, muestra un desempeño altamente confiable, con una disponibilidad global del 99,86 %. La mayoría de los equipos, en especial los extractores y correas transportadoras, operaron sin detenciones, alcanzando disponibilidades del 100 % durante el período analizado.

Las pequeñas pérdidas, registradas principalmente en la válvula VBA-212 (99,86 %) y en algunas estaciones de transferencia, se asociaron a paradas breves de mantenimiento, sin afectar la continuidad del proceso. En general, el área presenta un comportamiento estable y bien controlado, con baja frecuencia de fallas y una efectiva gestión de mantenimiento que garantiza la descarga y transferencia continua del producto sólido.

- Área 2237: Granulado Prilado.

Tabla 17

Disponibilidad física por equipos en el área 2237.

Equipos	T op (h)	TFS (h)	Ai real (%)	Ai real sub (%)
2237-ELC-223	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2237-CHU-397	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2237-HAR-243	6504,00	17,00	99,74%	100,00%

2237-ENF-247	6504,00	0,00	100,00%	
2237-HAR-227	6504,00	7,78	99,88%	100,00%
2237-ENF-231	6504,00	2,00	99,97%	
2237-CHU-246	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2237-ELC-238	6504,00	2,33	99,96%	99,96%
2237-COR-436	6504,00	6,38	99,90%	99,90%
2237-COR-354	6504,00	13,82	99,79%	100,00%
2237-CHU-431	6504,00	0,00	100,00%	

Fuente. Elaboración propia.

El análisis de la disponibilidad física real del Área 2237 muestra un desempeño confiable y estable, con una disponibilidad global de 99,87 %. La mayoría de los equipos operaron sin interrupciones, alcanzando valores cercanos o iguales al 100 %.

Las pequeñas pérdidas se concentraron en los harneros HAR-243 (99,74%) y HAR-227 (99,88 %), junto con la correa COR-354 (99,79 %), afectadas por detenciones menores de corta duración. En conjunto, el área mantiene una alta confiabilidad técnica y una gestión de mantenimiento eficiente, lo que asegura la continuidad del proceso y un desempeño global sobresaliente.

- Área 2260: Almacenamiento, Envasado y Despacho.

Tabla 18

Disponibilidad física por equipos en el área 2260.

Equipos	T op (h)	TFS (h)	Ai real (%)	Ai real sub (%)
2260-ATG-501	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2260-EST-500	6504,00	0,00	100,00%	
2260-BBA-970	6504,00	0,00	100,00%	99,85%
2260-TBA-488	6504,00	0,00	100,00%	
2260-COR-494	6504,00	6,00	99,91%	
2260-ELC-491	6504,00	3,00	99,95%	
2260-COR-540	6504,00	1,00	99,98%	
2260-CHU-514	6504,00	0,00	100,00%	
2260-BBA-972	6504,00	0,00	100,00%	99,89%
2260-TBA-460	6504,00	0,00	100,00%	
2260-COR-466	6504,00	1,50	99,98%	
2260-ELC-463	6504,00	0,00	100,00%	
2260-COR-534	6504,00	5,70	99,91%	
2260-CHU-472	6504,00	0,00	100,00%	

2260-SIL-518	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2260-VAC-898	6504,00	0,00	100,00%	
2260-COR-543	6504,00	0,00	100,00%	
2260-SIL-522	6504,00	0,00	100,00%	100,00%
2260-VAC-900	6504,00	0,00	100,00%	
2260-SIL-481	6504,00	1,50	99,98%	
2260-VAC-481	6504,00	0,00	100,00%	99,98%
2260-COR-537	6504,00	0,00	100,00%	
2260-SIL-477	6504,00	6,90	99,89%	
2260-VAC-868	6504,00	0,00	100,00%	99,89%

Fuente. Elaboración propia.

El análisis de la disponibilidad física real del Área 2260 refleja un desempeño sobresaliente, con una disponibilidad global de 100 %. Los equipos principales, como silos, correas transportadoras, válvulas y bombas, operaron de forma continua durante el período analizado, sin registrar detenciones que afectaran la producción.

Las pequeñas pérdidas, observadas en algunos equipos como las correas COR-494 y COR-534 o los silos SIL-477 y SIL-481, fueron mínimas y asociadas a ajustes operativos o mantenimientos programados. En general, el área se caracteriza por una alta confiabilidad técnica, un control operativo eficiente y una gestión de mantenimiento bien planificada, lo que garantiza la continuidad del proceso de envasado y despacho con un desempeño óptimo.

8.4. Análisis de criticidad

El análisis de criticidad es una etapa fundamental dentro de la gestión de activos y la ingeniería de confiabilidad, ya que con esto permite identificar y jerarquizar los equipos o sistemas que generen un mayor impacto sobre la continuidad operacional, la seguridad y los resultados económicos de la planta.

El objetivo principal de esta etapa es determinar el nivel de criticidad de todos los activos presentes en Planta Prilado, considerando variables como la probabilidad de falla, consecuencias operacionales, económicas, ambientales y de seguridad.

La finalidad de este análisis es identificar los activos más críticos para así luego dar continuidad a la evaluación del OEE.

De acuerdo con la literatura, la criticidad C_i de un activo se define como:

$$Ci = f(\text{Frecuencia de falla}, \text{Consecuencia}) \quad (4)$$

Donde:

- Frecuencia de falla se asocia a la confiabilidad del activo o tasa de fallas λ .
- Consecuencia se evalúa como la severidad del impacto productivo, económico, ambiental o de seguridad que se genera ante la ocurrencia de una falla.

Teniendo esto en consideración la estructura de la matriz es la siguiente:

Tabla 19 *Matriz de criticidad.*

Matriz de Criticidad						
Frecuencia	5	A	A	MA	MA	MA
	4	M	M	A	A	MA
	3	M	M	M	A	MA
	2	B	B	B	M	A
	1	B	B	B	M	A
		1	2	3	4	5
		Consecuencias				

Fuente. Elaboración propia.

Donde:

MA : Muy Alta Criticidad

A : Alta Criticidad

M : Media Criticidad

B : Baja Criticidad

Los criterios para la asignación de niveles se calculan de la siguiente forma:

Tabla 20

Cálculos criterios para la asignación de niveles

Criterio	Calculo
Nivel de disponibilidad	Se utiliza el A_i real
Impacto en la producción	Se realiza sacando un % del plan programado
Redundancia o capacidad de reemplazo	Se realiza por medio de los diagramas
Consecuencias de falla (medio ambiente, económicas y de seguridad)	Se realiza en base a una ponderación asociada a la destrucción del negocio si el activo se encuentra en falla

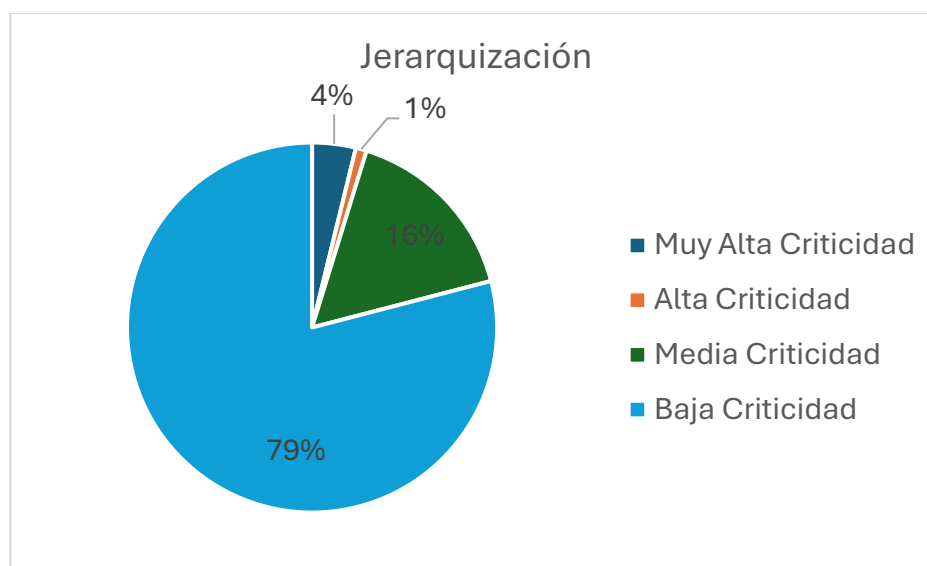
Fuente. Elaboración propia

Las tablas con la descripción de cada criterio se encuentran en Anexo A.

Luego de realizar todos los cálculos asociados a la matriz de criticidad se obtienen los siguientes resultados:

Ilustración 8

Gráfico jerarquización de activos críticos.



Fuente. Elaboración propia

En el gráfico indica que un 4 % de los activos se encuentra en una etapa Muy alta criticidad, un 1% en Alta criticidad, un 16 % en mediana criticidad y un 79 % en baja criticidad, el total de activos analizados es de 105, los cuales solo 4 pertenecen al 4 % de activos en Muy alta criticidad.

Teniendo en cuenta estos resultados, solo se seguirán trabajando en base a estos 4 activos de Muy alta criticidad.

Tabla 21

Listado de activos identificados como muy alta criticidad.

Equipo
2255-SER-050
2255-ELC-137

2240-CAL-154
2240-CAL-170
2270-CAL-H32

Fuente. Elaboración propia

La tabla con el análisis de todos los activos se encuentra en Anexo B.

8.5. Evaluación de la continuidad Funcional del proceso

La continuidad funcional del proceso fue evaluada mediante el indicador OEE (Overall Equipment Effectiveness), aplicado a los activos críticos previamente definidos en la matriz de criticidad.

De acuerdo con Arata & Arata (2013), el OEE constituye una medida integral que permite conocer qué tan eficiente es un activo en el aprovechamiento de su tiempo disponible para generar producción útil y dentro de especificaciones. El indicador se obtiene como el producto de tres factores: disponibilidad (A_i), rendimiento y calidad, permitiendo evaluar de forma global la efectividad operacional de los equipos.

En concordancia con la metodología de gestión del mantenimiento propuesta por Crespo, Stegmaier, Barberá y Viveros (2012), el análisis de continuidad funcional consideró el conjunto total de activos de la planta; sin embargo, el cálculo del OEE se aplicó exclusivamente al 4 % de los equipos clasificados con muy alta criticidad, ya que son estos los que tienen el mayor impacto en la disponibilidad global del proceso y en la continuidad operacional. Los resultados obtenidos en dichos activos representan el comportamiento de los equipos más determinantes del sistema, permitiendo proyectar el desempeño general de cada área y del proceso completo.

La disponibilidad utilizada corresponde a la disponibilidad física real (A_i) de cada activo seleccionado, obtenida a partir de los registros históricos de operación y detenciones del período 2024. El rendimiento se determinó como la relación entre la tasa de producción real y la tasa de producción teórica programada, mientras que el factor de calidad se calculó como el porcentaje de producto conforme respecto al total procesado.

Dado que las áreas analizadas operan en trenes productivos secuenciales, se consideró que los factores de rendimiento y calidad son homogéneos para todos los activos de una misma área, variando únicamente la disponibilidad individual. Este enfoque permite

representar de forma más precisa la pérdida global de eficiencia asociada a la indisponibilidad de los equipos más relevantes para la continuidad del proceso.

$$OEE_i = A_i \times P \times Q \quad (5)$$

Donde:

A_i : Disponibilidad física del activo i

P : Rendimiento (Toneladas reales/Toneladas teóricas)

Q : Calidad (Producto conforme/Total procesado)

Tabla 22

OEE por equipo crítico.

Equipo	A_i real	P	Q	OEE
2270-CAL-H32	96,97%	91,36%	92,70%	82,13%
2255-SER-050	99,54%	91,36%	92,70%	84,30%
2255-ELC-137	99,63%	91,36%	92,70%	84,39%
2240-CAL-154	98,24%	91,36%	92,70%	83,20%
2240-CAL-170	99,43%	91,36%	92,70%	84,21%

Fuente. Elaboración propia.

Los valores de OEE obtenidos para los activos de muy alta criticidad se presentan en la Tabla 22, donde se observa que las eficiencias globales de los equipos fluctúan entre 82,13 % y 84,39 %.

Estos resultados reflejan un nivel de desempeño operativo adecuado, considerando que, según los criterios establecidos por Arata & Arata (2013) y Crespo, Stegmaier, Barberá y Viveros (2012), un OEE superior al 85 % se clasifica como un nivel de excelencia operacional, mientras que valores entre 70 % y 85 % corresponden a un rango de eficiencia aceptable o estable, propio de plantas en operación continua con oportunidades de mejora en disponibilidad o rendimiento.

En este caso, los activos 2255-SER-050 y 2255-ELC-137 registran los mayores valores de OEE (84,30 % y 84,39 %, respectivamente), impulsados por sus altos niveles de disponibilidad física (superiores al 99 %). Estos equipos evidencian una gestión de mantenimiento eficiente y un comportamiento operacional confiable.

Por otra parte, los equipos 2240-CAL-154, 2240-CAL-170 y 2270-CAL-H32 presentan valores levemente inferiores (82,13 % a 84,21 %), asociados principalmente a

disponibilidades menores (entre 96 % y 98 %), lo cual sugiere la presencia de paradas correctivas o mantenimientos no planificados que impactan parcialmente la eficiencia global.

En síntesis, los resultados obtenidos permiten concluir que los activos de muy alta criticidad mantienen un desempeño operativo sólido, con una eficiencia global promedio cercana al 83 %, lo que valida la continuidad funcional del proceso y evidencia un buen equilibrio entre confiabilidad y productividad. No obstante, se identifican oportunidades de mejora orientadas a la optimización de los tiempos de intervención y a la reducción de detenciones no programadas.

8.6. Identificación de cuellos de botella

Luego de caracterizar el desempeño operativo de la planta mediante el cálculo de la disponibilidad esperada y la disponibilidad física, y una vez priorizados los activos mediante la matriz de criticidad y el análisis del OEE, el siguiente capítulo se orienta a determinar qué equipo, dentro de los de mayor impacto, está realmente restringiendo la capacidad global del sistema. Para ello, se analiza cómo se comportan las áreas en términos de disponibilidad, se revisan las horas de detención históricas y se evalúa su efecto acumulado mediante herramientas como el Pareto y el Jackknife, integrando además la forma en que los equipos se conectan dentro del proceso (serie o paralelo). Con este enfoque se busca identificar, no solo qué activos presentan mayores fallas, sino cuál de ellos afecta directamente la producción total y se comporta como el verdadero cuello de botella del sistema.

- Detección de equipos cuya falla afecta directamente la producción total

Para determinar qué activos tienen impacto directo sobre la producción, se consideró inicialmente la disponibilidad por área.

Tabla 23

Disponibilidad esperada por áreas.

Área	Ai	Perdida Ton/año
Área 2255	98,91%	2186,09
Área 2240	99,75%	503,09
Área 2270	95,84%	8333,13
Área 2252	99,85%	310,28
Área 2237	99,85%	291,33
Área 2260	100,00%	0,00

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 24

Disponibilidad física por áreas.

Área	Ai real	Perdida Ton/año
Área 2255	98,99%	2043,43
Área 2240	97,35%	5372,71
Área 2270	96,14%	7817,19
Área 2252	99,50%	1006,65
Área 2237	99,24%	1535,36
Área 2260	99,61%	797,02

Fuente. Elaboración propia.

Los resultados muestran que el Área 2270 concentra la mayor pérdida productiva anual, alcanzando:

- $A_e = 94,28 \%$ → pérdida de 11.628 ton/año
- $A_i = 91,12 \%$ → pérdida de 18.572 ton/año

Donde:

A_e : Disponibilidad esperada

A_i : Disponibilidad física

Este comportamiento evidencia que los equipos críticos del área 2270 tienen un rol directo en la tasa de producción y que cualquier detención en dicha área repercute de forma inmediata sobre la producción final.

Complementariamente, el análisis de los RBD muestra lo siguiente:

El área 2240 posee dos equipos de críticos (CAL-154 y CAL-170) operando en paralelo, lo cual otorga redundancia operativa. Por lo tanto, la falla de uno de ellos no detiene el flujo del sistema, ya que el otro equipo puede asumir la carga.

En cambio, en el área 2270 el equipo CAL-H32 opera en serie, sin rutas alternas ni equipos en paralelo.

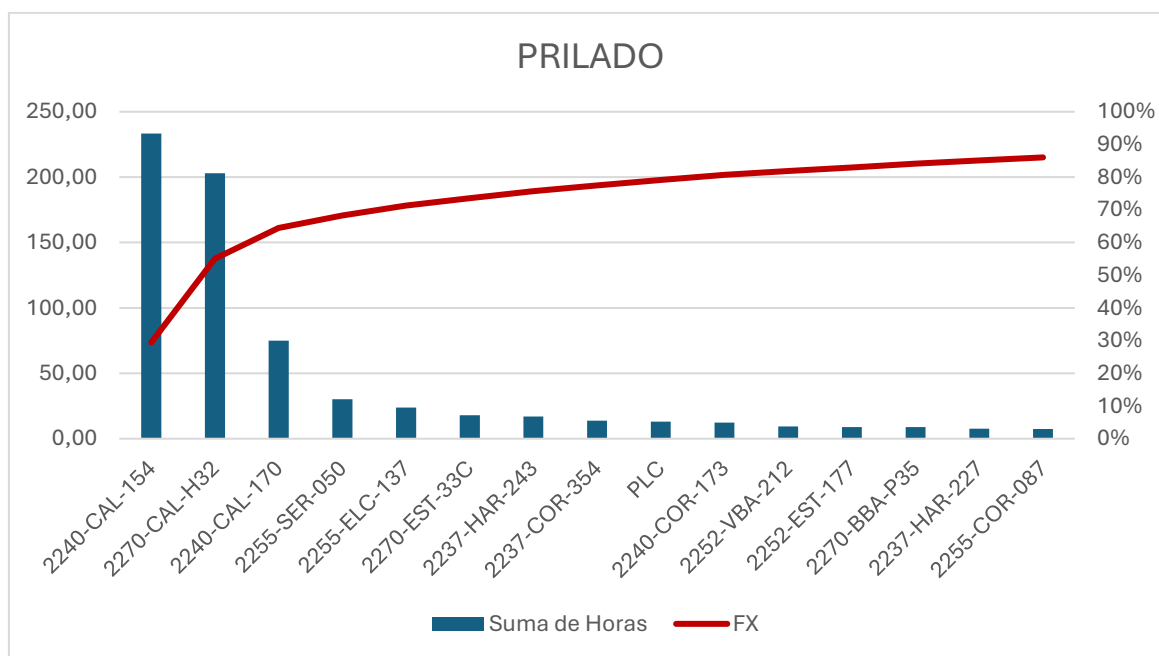
Esto implica que cualquier detención del H32 interrumpe completamente el proceso, afectando directamente la producción total.

Con base en la configuración funcional del proceso, se observa que solo los equipos ubicados en líneas sin redundancia tienen potencial real de afectar la producción total.

- Análisis del comportamiento histórico de detenciones en equipos clave

Ilustración 9

Gráfico Pareto planta Prilado año 2024.



Fuente. Elaboración propia

El historial de horas de detención se analizó mediante un diagrama de Pareto, que muestra que tres equipos concentran más del 80 % de las detenciones: 2240-CAL-154, 2270-CAL-H32 y 2240-CAL-170. Sin embargo, al interpretar estos resultados junto con el RBD se

evidencia que, aunque CAL-154 y CAL-170 presentan altos tiempos de detención, su impacto es mitigado debido a su operación en paralelo.

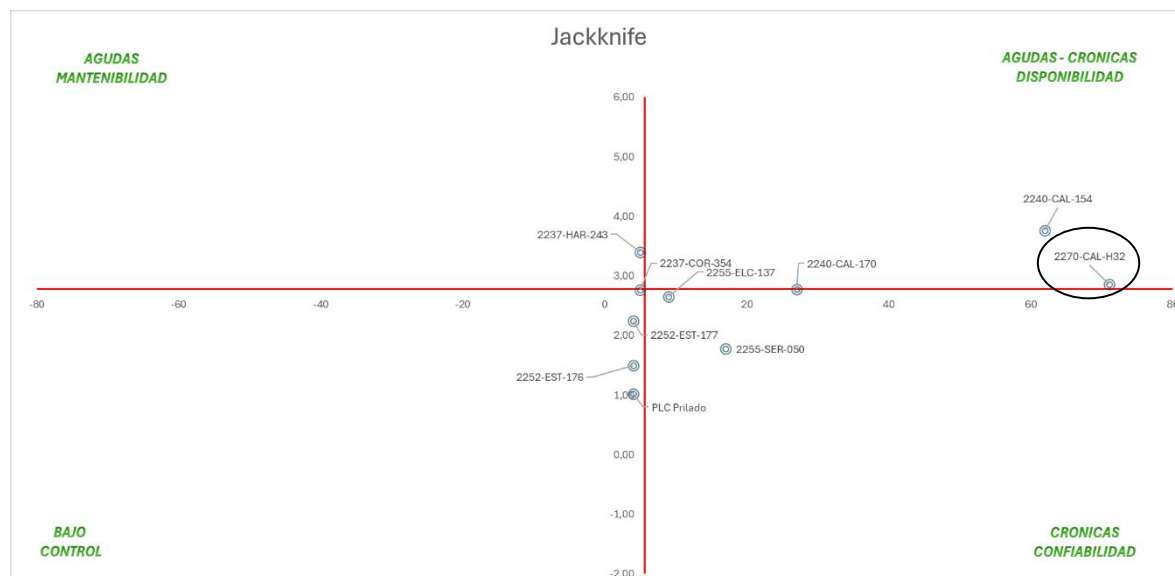
El único equipo que combina altas horas de detención con una posición estructural en serie es el 2270-CAL-H32.

Por este motivo, el Pareto por sí solo puede inducir a conclusiones parciales, siendo necesario complementarlo con una evaluación de criticidad funcional.

- Confirmación del equipo crítica mediante análisis Jackknife

Ilustración 10

Jackknife acumulado del año 2024 en planta Prilado.



Fuente. Elaboración propia.

El análisis Jackknife evaluó el impacto de retirar cada equipo del sistema, permitiendo medir cómo cambia la disponibilidad global al excluir un activo específico.

Los resultados muestran que, CAL-H32 se ubica dentro del cuadrante de fallas crónicas vinculadas a confiabilidad, presentando la mayor caída de desempeño sistémico al ser retirado.

CAL-154 y CAL-170, pese a sus históricas detenciones, tienen un impacto significativamente menor debido a su redundancia funcional.

Este análisis confirma que el CAL-H32 es el equipo que presenta la mayor restricción operativa y que su falla afecta directamente la producción total.

En definitiva, al integrar, el comportamiento histórico de detenciones, el impacto funcional en cada activo y la arquitectura lógico-funcional del proceso es posible afirmar que el equipo 2270-CAL-H32 constituye el verdadero cuello de botella del sistema, esto se debe a que:

- Opera en serie, sin equipos alternos,
- Concentra una fracción significativa de las detenciones del proceso,
- Cualquier falla detiene completamente la línea productiva,
- Es el activo que produce la mayor caída de disponibilidad cuando se evalúa mediante Jackknife.

Por el contrario, los equipos CAL-154 y CAL-170, aunque presentan altos tiempos de detención, no afectan directamente la producción total debido a su operación en paralelo, lo que les otorga capacidad de respaldo mutuo.

8.7. Estimación de costos asociados

Con los equipos de muy alta criticidad ya definidos (CAL-154, CAL-170 y 2270-CAL-H32), el presente capítulo se orienta a cuantificar el impacto económico asociado a su indisponibilidad. Para ello se utilizan los registros reales de detenciones del período 2024, estimando la pérdida de producción en toneladas y su equivalente en USD tanto a nivel de equipo como a nivel de sistema (área). Este análisis permite comparar el peso económico de cada activo, identificar qué equipos generan la mayor pérdida anual y validar, desde una perspectiva financiera, cuál de ellos ejerce el mayor efecto sobre la capacidad productiva del proceso.

- Metodología de cálculo de costos

El cálculo del impacto económico asociado a la indisponibilidad de los activos se realizó a partir de la cuantificación de la pérdida de producción anual y su valorización económica,

considerando exclusivamente el efecto atribuible a la pérdida de continuidad funcional del proceso.

En primer lugar, se determinó la producción no realizada, expresada en toneladas por año, como consecuencia directa de la indisponibilidad real de cada activo, utilizando los registros históricos de detenciones correspondientes al año 2024. Este enfoque asegura coherencia con el cálculo previo de la disponibilidad física y evita la incorporación de supuestos ajenos a la operación real del sistema.

Posteriormente, la pérdida de producción fue valorizada económicamente mediante el Costo de Ineficiencia Potencial, entendido como la pérdida económica asociada al margen de contribución que el proceso deja de capturar debido a la indisponibilidad. De acuerdo con la literatura de confiabilidad y gestión de activos, el costo relevante ante eventos de detención no corresponde al valor total de facturación, sino al margen económico, dado que los costos variables del proceso no se incurren durante los períodos de detención.

En ausencia de información detallada de costos operacionales desagregados, se adoptó una estimación conservadora, considerando que los costos variables del proceso representan el 60 % del precio de venta del producto, por lo que el margen de contribución asociado a la producción perdida corresponde al 40 % del valor unitario de venta.

En base a lo anterior, el costo de ineficiencia potencial se calculó mediante la expresión (6):

$$C_{IP} = Q_{perdida} * P_{venta} * (1 - \alpha) \quad (6)$$

Donde:

- C_{IP} : Costo de Ineficiencia Potencial [USD/año]
- $Q_{perdida}$: Producción no realizada por indisponibilidad [ton/año]
- P_{venta} : Precio unitario de venta del producto [USD/ton]
- α : Fracción de costos variables del proceso (en este estudio, 0,60)
- $(1 - \alpha)$: Margen de contribución asociado a la producción perdida

Con:

$$\alpha = 0,60 \Rightarrow (1 - \alpha) = 0,40$$

Por lo tanto:

$$C_{IP} = Q_{perdida} * P_{venta} * 0,40$$

- Costos por equipo crítico

Los resultados obtenidos evidencian diferencias relevantes en el impacto financiero asociado a la indisponibilidad de cada activo crítico analizado, lo que permite identificar aquellos equipos que generan una mayor destrucción de valor para el negocio.

Tabla 25

Comportamiento económico equipos críticos.

Equipo	Ai real	Tiempo esperado F/E	Destrucción del Negocio USD	
2240-CAL-154	98,06%	126,49	\$	1.979.290
2240-CAL-170	99,38%	37,27	\$	643.524
2270-CAL-H32	96,62%	196,93	\$	3.400.501

Fuente. Elaboración propia.

De la Tabla 25 se interpreta lo siguiente:

2240-CAL-154: Este equipo presenta el mayor impacto económico dentro del área 2240, con una destrucción anual del negocio cercana a USD 1,9 millones, atribuida principalmente a su mayor tiempo esperado fuera de servicio. A pesar de operar en configuración paralela con el equipo 2240-CAL-170, su mayor frecuencia histórica de fallas incrementa significativamente su contribución a las pérdidas económicas. En consecuencia, este activo se identifica como el equipo dominante en costos dentro del par redundante y constituye el principal foco de atención para acciones de mejora en confiabilidad en el área 2240.

2240-CAL-170: Este equipo presenta una indisponibilidad considerablemente menor, reflejada en un tiempo esperado en falla de 37,27 h y una destrucción del negocio del orden de USD 643 mil anuales, aproximadamente tres veces inferior a la del 2240-CAL-154. Este comportamiento confirma que, dentro del sistema en paralelo, el 2240-CAL-170 cumple adecuadamente su rol de respaldo operacional, contribuyendo a mitigar el impacto global de las detenciones no programadas del área.

2270-CAL-H32: El equipo 2270-CAL-H32 registra una destrucción del negocio de aproximadamente USD 3,4 millones anuales, asociada a un tiempo esperado fuera de servicio de 196,93 h, constituyéndose como el activo con mayor impacto económico individual entre los equipos analizados. A diferencia del área 2240, este calentador opera en configuración en serie y sin redundancia, lo que implica que cualquier evento de falla se traduce directamente en una pérdida de capacidad productiva del sistema. Esta condición amplifica significativamente su impacto sobre la continuidad operacional, justificando técnicamente la evaluación de estrategias de redundancia, mejoras de confiabilidad o modificaciones en la estrategia de mantenimiento.

- Costos asociados al sistema

La estimación de los costos a nivel de sistema se realizó considerando la disponibilidad física real (A_i) obtenida para cada área durante el año 2024, junto con las toneladas efectivamente perdidas y su equivalente económico en USD. Los resultados permiten visualizar de manera clara cómo la indisponibilidad de cada área contribuye a la pérdida total de producción de la planta.

Tabla 26

Distribución de pérdida esperada en toneladas y USD.

Área	A_i real	Perdida Ton/año	USD
Área 2255	98,99%	2043,43	\$ 1.144.323
Área 2240	97,35%	5372,71	\$ 3.008.716
Área 2270	96,14%	7817,19	\$ 4.377.626
Área 2252	99,50%	1006,65	\$ 563.723
Área 2237	99,24%	1535,36	\$ 859.802
Área 2260	99,61%	797,02	\$ 446.334

Fuente. Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 26, existe una diferencia significativa en el peso económico de cada área. El Área 2270 destaca como la unidad con mayor impacto en el sistema, registrando una disponibilidad física real de 96,14 % y acumulando una pérdida anual de 7.817,19 toneladas, equivalente a USD 4.377.626, lo que la posiciona como el principal componente de pérdida económica de la planta. Este comportamiento confirma que

cualquier indisponibilidad en el tren productivo del área 2270 incide directamente en la producción final del sistema.

El Área 2240 presenta el segundo mayor impacto económico, con una pérdida estimada de 5.372,71 toneladas por año y un costo asociado de USD 3.008.716. A pesar de contar con redundancia en equipos críticos, como los calentadores CAL-154 y CAL-170, la magnitud de su carga productiva explica su contribución relevante al costo total de indisponibilidad.

Por su parte, el Área 2255 registra una pérdida de 2.043,43 toneladas por año, equivalente a USD 1.144.323, atribuida principalmente a la elevada cantidad de activos involucrados y a su rol como área de alimentación del proceso, lo que amplifica el efecto de las detenciones no programadas.

Las áreas 2252, 2237 y 2260 presentan impactos económicos comparativamente menores, con pérdidas individuales inferiores a USD 1 millón anual, asociadas a altos niveles de disponibilidad física real, superiores al 99 %, lo que limita su incidencia sobre la pérdida global del sistema.

En conjunto, el sistema presenta una pérdida total estimada de 18.572,36 toneladas por año, con un impacto económico agregado de USD 10.400.524, cifra que representa el costo directo anual asociado a las detenciones no programadas de la planta durante el período analizado.

- Impacto económico

El análisis del impacto económico evidencia que la indisponibilidad del sistema no afecta de manera homogénea a todas las áreas, sino que se concentra principalmente en los activos y trenes productivos que operan sin redundancia funcional efectiva. En este contexto, el Área 2270 se posiciona como la unidad con mayor impacto económico, registrando una pérdida anual de USD 4.377.626, lo que representa aproximadamente el 42 % del costo total anual de indisponibilidad del sistema.

Este resultado es coherente con los hallazgos del capítulo anterior, donde el equipo 2270-CAL-H32 fue identificado como el principal cuello de botella operativo del proceso, al formar parte de un tren productivo en configuración serie, sin rutas alternativas de operación. En consecuencia, cualquier evento de falla en esta área se traduce directamente en una pérdida total de producción, amplificando su impacto económico.

La correlación observada entre disponibilidad física, pérdida de toneladas y destrucción económica del negocio permite concluir que las áreas o equipos que operan en serie y carecen de redundancia estructural concentran el mayor riesgo financiero del sistema. Por el contrario, áreas como la 2240, que cuentan con configuraciones en paralelo en equipos críticos, particularmente en los calentadores CAL-154 y CAL-170, logran distribuir el riesgo operativo, atenuando el efecto económico de sus detenciones individuales, aun cuando manejan cargas productivas relevantes.

Desde una perspectiva práctica, el impacto económico se consolida como un criterio decisivo para priorizar las iniciativas de mejora, ya que no solo identifica las áreas más sensibles a fallas, sino que orienta la asignación eficiente de recursos hacia aquellos puntos donde la indisponibilidad genera mayores pérdidas económicas. En este sentido, el predominio del Área 2270 en el costo total de pérdidas valida que sus activos críticos representan el mayor riesgo financiero para la operación.

La indisponibilidad de esta área no solo reduce la capacidad productiva global del sistema, sino que genera una destrucción anual del negocio superior a USD 10 millones, consolidándola como el principal foco de atención para el diseño e implementación de estrategias de optimización, tales como mejoras en confiabilidad, reducción de tiempos de intervención, incorporación de redundancia operativa o ajustes en la estrategia de mantenimiento del sistema.

8.8. Caso de negocio

- Desarrollo de una propuesta técnica y financiera

Para la evaluación del caso de negocio y la cuantificación del impacto económico, no se utilizó la disponibilidad física histórica como penalización directa, dado que esta incluye detenciones por mantenimiento preventivo y paradas programadas que no representan pérdidas económicas para el negocio. En su lugar, se trabajó con la disponibilidad esperada a la falla, derivada de los indicadores de confiabilidad y mantenibilidad (MTBF y MTTR), de modo de capturar exclusivamente el efecto económico asociado a detenciones no programadas.

Con la identificación del 2270-CAL-H32 como principal cuello de botella del proceso, debido a su operación en serie y su impacto económico (USD 3.801.241 por destrucción del negocio), se evaluó la incorporación de un segundo equipo CAL-H32 para mejorar la disponibilidad del sistema:

- Incorporación de un segundo equipo 2270-CAL-H32

La instalación de un segundo 2270-CAL-H32 permitiría:

- Eliminar el único punto de falla del tren 2270
- Asegurar la continuidad operativa del área aun en presencia de fallas
- Aumentar la disponibilidad equivalente del sistema
- Reducir en forma directa la pérdida de toneladas anuales del área 2270 (7817,19 ton/año).

La redundancia del equipo eliminaría la dependencia de un solo activo crítico, disminuyendo el riesgo operacional y financiero asociado a las detenciones del H32 existente.

El caso actual representa los siguientes datos:

Tabla 27

Disponibilidad general de equipos área 2270.

Equipos	MTTR (h)	MTBF (h)	Ai (%)	Ai sub (%)	Tiempo esperado F/E	Destrucción del Negocio USD
2270-BBA-P41	2,50	2997,50	99,92%	99,92%	5,42	\$ 93.587,90
2270-EST-021	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-BBA-P29	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-FCA-F29	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-EST-030	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-BBA-P30	4,00	5996,00	99,93%	99,93%	4,34	\$ 74.870,32
2270-HEX-30A	3,00	5997,00	99,95%	99,95%	3,25	\$ 56.152,74
2270-HEX-30B	4,00	5996,00	99,93%	99,93%	4,34	\$ 74.870,32
2270-HEX-30C	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-HEX-30D	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-CAL-H32	2,86	81,65	96,62%	96,62%	220,14	\$ 3.801.241,02
2270-EST-14A	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-EST-14B	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-EST-33C	9,00	2991,00	99,70%	99,70%	19,51	\$ 336.916,44
2270-BBA-P33	2,50	2997,50	99,92%	99,92%	5,42	\$ 93.587,90
2270-EST-035	9,00	5991,00	99,85%	99,85%	9,76	\$ 168.458,22
2270-BBA-P35	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -

A sistema	95,84%	Ton/Año
Perdida esperada del sistema	8333,13	
Perdida esperada del sistema en USD	\$ 4.666.555	USD/Año

Fuente. Elaboración propia.

En la Tabla 27 se observa que el equipo 2270-CAL-H32 tiene una disponibilidad de 96,62 % y también se detalla el impacto económico antes mencionado.

El análisis del área 2270 como sistema permite determinar una disponibilidad general de 95,84 % impactando en USD 4.666.555 al año.

Con el objetivo de evaluar el efecto de una mejora estructural en la continuidad operacional del Área 2270, se incorpora un esquema de redundancia total en paralelo, específicamente una configuración 1+1, aplicada al equipo crítico 2270-CAL-H32. Este tipo de configuración corresponde a una redundancia en la cual cada uno de los equipos redundantes es capaz, de manera individual, de sostener completamente la función requerida por el sistema, sin necesidad de operación simultánea para cumplir con la demanda del proceso.

Desde el punto de vista de la ingeniería de la confiabilidad, esta disposición se clasifica como redundancia total en paralelo, ya que la condición de funcionamiento del sistema se mantiene mientras al menos uno de los equipos se encuentre operativo. En consecuencia, la falla del sistema ocurre únicamente cuando ambos equipos redundantes fallan de manera simultánea, lo que reduce significativamente la probabilidad de indisponibilidad respecto de una configuración en serie o sin redundancia.

La implementación de esta redundancia no modifica el tiempo total de operación anual del sistema, sino que redistribuye y mitiga el impacto de las fallas individuales, disminuyendo el tiempo fuera de servicio efectivo del sistema y, por extensión, la pérdida de producción y la destrucción económica asociada.

Este enfoque permite reflejar de manera consistente el efecto real de la redundancia total, evitando sobreestimar la indisponibilidad del sistema mediante la simple suma de tiempos fuera de servicio individuales.

Los resultados obtenidos tras la incorporación del esquema de redundancia total en paralelo se presentan en la Tabla 28, donde se detalla el desempeño de cada equipo del Área 2270, así como la disponibilidad global del sistema, la pérdida esperada de producción y la destrucción económica anual asociada.

Tabla 28

Disponibilidad general de equipos después de la mora del área 22270.

Equipos	MTTR (h)	MTBF (h)	Ai (%)	Ai sub (%)	Tiempo esperado F/E	Destrucción del Negocio USD
2270-BBA-P41	2,50	2997,50	99,92%	99,92%	5,42	\$ 93.587,90
2270-EST-021	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-BBA-P29	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-FCA-F29	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-EST-030	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-BBA-P30	4,00	5996,00	99,93%	99,93%	4,34	\$ 74.870,32
2270-HEX-30A	3,00	5997,00	99,95%	99,95%	3,25	\$ 56.152,74
2270-HEX-30B	4,00	5996,00	99,93%	99,93%	4,34	\$ 74.870,32
2270-HEX-30C	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-HEX-30D	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-CAL-H32	2,86	81,65	96,62%	99,89%	7,45	\$ 128.661,87
2270-CAL-H33	2,86	81,65	96,62%			
2270-EST-14A	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-EST-14B	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
2270-EST-33C	9,00	2991,00	99,70%	99,70%	19,51	\$ 336.916,44
2270-BBA-P33	2,50	2997,50	99,92%	99,92%	5,42	\$ 93.587,90
2270-EST-035	9,00	5991,00	99,85%	99,85%	9,76	\$ 168.458,22
2270-BBA-P35	0,00	0,00	100,00%	100,00%	0,00	\$ -
A sistema				99,09%	Ton/Año	USD/Año
Pérdida esperada del sistema				1827,26		
Pérdida esperada del sistema en USD				\$ 1.023.264		

Fuente. Elaboración propia.

Después de considerar instalar otro CAL-H32B, se ve reflejado un aumento en la disponibilidad del subsistema de calentamiento y a su vez un aumento en la disponibilidad general del área 2270, impactando en una disminución de 6505,88 Ton al año en pérdidas. Por último, comienza con la evaluación económica al instalar un equipo H32B en paralelo al existente, considerando una inversión inicial de USD \$6.953.486 (valor obtenido de la instalación equipo anterior.)

Dado que la iniciativa corresponde a una mejora operacional interna basada en la incorporación de redundancia sobre un equipo cuya tecnología se encuentra validada en operación, y cuyos beneficios económicos se derivan principalmente de la reducción de

pérdidas por indisponibilidad previamente cuantificadas, se considera que el proyecto presenta un bajo riesgo técnico y un riesgo económico moderado.

Adicionalmente, el activo intervenido ha sido identificado como cuello de botella del proceso, concentrando aproximadamente el 42% de las pérdidas económicas asociadas a indisponibilidad, lo que otorga mayor certeza a la estimación de beneficios futuros.

La tasa de descuento utilizada fue definida por el área de estudios de la organización, a partir de los antecedentes técnicos y económicos del proyecto, considerando su naturaleza, nivel de riesgo y características operacionales. Para ello, se entregó a dicha área una descripción detallada del alcance de la iniciativa y de los beneficios esperados, y en función de este análisis se estableció una tasa de descuento real anual del 10%, la cual responde a un criterio metodológico conservador aplicado sistemáticamente por dicha área, que incorpora un castigo deliberado a las iniciativas de mejora con el objeto de resguardar la robustez de la evaluación económica.

Tabla 29

Análisis económico de la mejora implementada.

Pérdida económica antes de la mejora	\$ 4.666.555
Pérdida económica después de la mejora	\$ 1.023.264
Riesgo Reducido	\$ 3.643.291
Tasa descuento	10%

Nota. El riesgo reducido corresponde a la diferencia entre la pérdida económica estimada antes y después de la implementación de la mejora, representando el beneficio económico anual asociado a la reducción de la indisponibilidad del sistema.

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 30

Flujo de caja proyecto de mejora por reducción del costo de indisponibilidad.

Año	0	1	2	3	4	5
Inversión	\$ -6.953.486					
Operación						
Riesgo		\$ 3.643.291	\$ 3.643.291	\$ 3.643.291	\$ 3.643.291	\$ 3.643.291
Flujo	\$ -6.953.486	\$ 3.643.291	\$ 3.643.291	\$ 3.643.291	\$ 3.643.291	\$ 3.643.291

VAN	\$ 6.857.452					
TIR	43,91%					
Flujo acumulado	\$ -6.953.486	\$ -3.310.195	\$ 333.095	\$ 3.976.386	\$ 7.619.676	\$ 11.262.967

PayBack	1,91
ROI	52,40%

Nota. El flujo positivo anual corresponde al beneficio económico asociado a la reducción del costo de indisponibilidad del sistema, estimado a partir del riesgo reducido identificado en el análisis económico.

Fuente. Elaboración propia.

La mejora presenta un VAN altamente positivo, una TIR de 43,91 %, un periodo de recuperación de 1,91 años y un ROI de 52,40 %, evidenciando una buena rentabilidad y recuperando la inversión en menos de dos años. Este comportamiento se explica por la eliminación del costo de no confiabilidad asociado a las detenciones del equipo H32 original.

Tabla 31

Indicadores económicos del proyecto.

Caso	VAN	Inversión	IVAN
2270-CAL-H32B	\$ 6.857.452	\$ -6.953.486	1,0

Nota. El indicador IVAN corresponde al índice de valor actual neto, definido como la razón entre el VAN del proyecto y la inversión inicial, y permite evaluar la rentabilidad relativa de la alternativa analizada.

Fuente. Elaboración propia.

El Índice de Valor Actual Neto (IVAN = 1,0) indica que, por cada dólar invertido, el proyecto genera 1,0 dólares de valor presente. Esto lo posiciona como una buena alternativa dentro del portafolio de inversiones asociadas a confiabilidad.

9. Conclusiones

El estudio confirma que el objetivo general y los objetivos específicos fueron plenamente alcanzados.

En primer lugar, se realizó el levantamiento estructurado de activos por área y se calcularon los indicadores de confiabilidad básica, lo que permitió identificar el comportamiento operativo real de cada equipo y las diferencias entre la disponibilidad esperada y la disponibilidad física.

Posteriormente, se aplicó una matriz de criticidad que permitió clasificar los activos según su impacto operacional, identificando un porcentaje reducido de equipos de muy alta criticidad. Entre estos, los análisis de OEE, Pareto, RBD y Jackknife confirmaron que el equipo 2270-CAL-H32 constituye el principal cuello de botella del proceso debido a su operación en serie y a su elevada contribución a las detenciones del Área 2270, registrando una disponibilidad física real de 96,97 %, un tiempo esperado fuera de servicio de 196,93 h y una destrucción del negocio del orden de USD 3.400.501 anuales.

El estudio también determinó el costo económico asociado a la indisponibilidad de los activos, estableciendo que el Área 2270 presenta una disponibilidad física global de 96,14 %, concentrando una pérdida anual estimada de 7.817,19 toneladas, equivalente a USD 4.377.626, posicionándose como el área de mayor impacto económico dentro del sistema productivo. Este resultado valida la necesidad de intervenir el equipo CAL-H32 desde una perspectiva técnica y financiera.

Finalmente, se desarrolló un caso de negocio técnico y económico que propone incorporar un segundo CAL-H32 en configuración paralela, considerando una inversión inicial de USD 6.953.486. Esta mejora reduce la pérdida económica anual desde USD 4.666.555 a USD 1.023.264, generando un riesgo reducido de USD 3.643.291 por año. Los indicadores financieros obtenidos evidencian una alta rentabilidad del proyecto, con un VAN de USD 6.857.452, una TIR de 43,91 %, un ROI de 52,40 % y un período de recuperación de 1,91 años, superando ampliamente el objetivo mínimo de reducción de indisponibilidad del 15 %.

En consecuencia, el estudio entrega una solución factible, rentable y alineada con la estrategia de gestión de activos, contribuyendo a mejorar la continuidad operativa y el desempeño productivo de la Planta Prilado CS.

10. Bibliografía

Anthony, R. N. (1998). Management control systems. McGraw-Hill.

Arata, A., & Arata, A. (2010). Ingeniería de la confiabilidad. Alfaomega Grupo Editor.

Barberá, L., Crespo, A., Viveros, P., & Stegmaier, R. (2012). Advanced model for maintenance management in a continuous improvement cycle: Integration into the business strategy. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, 3(1), 47–63. <https://doi.org/10.1007/s13198-012-0092-y>

Blanchard, B. S. (1998). System engineering management. Wiley.

Comité Europeo de Normalización. (2001). EN 13306: Maintenance terminology. CEN.

Crespo Márquez, A., Stegmaier, R., Barberá, L., & Viveros, P. (2012). Maintenance management models: A survey and analysis. University of Seville Press.

International Organization for Standardization. (2014). ISO 55000: Asset management — Overview, principles and terminology. ISO.

Kans, M. (2008). The influence of maintenance management on production performance. *International Journal of Production Research*, 46(24), 697–708.

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1996). The balanced scorecard: Translating strategy into action. Harvard Business School Press.

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2005). The balanced scorecard: Measures that drive performance. *Harvard Business Review*, 83(7), 172–180.

Moubray, J. (1997). Reliability-centered maintenance (RCM II). Butterworth-Heinemann.

Parida, A., & Chattopadhyay, G. (2007). Development of a multi-criteria hierarchical framework for maintenance performance measurement. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 13(3), 241–258.

Pintelon, L., & Parodi-Herz, A. (2012). Maintenance: An evolutionary perspective. En *Handbook of maintenance management and engineering* (pp. 21–48). Springer.

Valdez-Flores, C., & Feldman, R. M. (1989). A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems. *Naval Research Logistics*, 36(4), 419–446.

Wang, H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139(3), 469–489.

Woodhouse, J. (1991). Total maintenance management. *Maintenance Journal*.

11. Anexos

Anexo A

Tabla A1

Descripción criterios para la elaboración de la Matriz de Criticidad

Frecuencia de Fallas FF		
Escala	Descripción técnica / Característica	Condición operacional o situación representativa
1	Muy baja ($< 0,0001$ f/h)	Alta confiabilidad, sin fallas significativas en el periodo analizado.
2	Baja ($0,0001 - 0,0003$ f/h)	Ocurren fallas aisladas; mantenimientos preventivos efectivos.
3	Media ($0,0003 - 0,0007$ f/h)	Fallas recurrentes controlables mediante acciones correctivas puntuales.
4	Alta ($0,0007 - 0,0015$ f/h)	Fallas frecuentes, requerimiento de revisión técnica o rediseño.
5	Muy alta ($> 0,0015$ f/h)	Equipo inestable, propenso a fallas graves; prioridad inmediata en el plan de mejora.
Consecuencias Nivel de disponibilidad		
Escala	Descripción técnica / Característica	Condición operacional o situación representativa
1	Muy alta disponibilidad ($\geq 99,8$ %)	Equipo sin fallas registradas o con mantenimientos menores sin impacto productivo.
2	Alta ($99,5 - 99,8$ %)	Operación estable, con detenciones planificadas que no afectan la continuidad.
3	Media ($98 - 99,5$ %)	Fallas ocasionales o mantenimientos correctivos que afectan levemente el cumplimiento del plan.
4	Baja ($95 - 98$ %)	Paradas no planificadas frecuentes que interrumpen producción parcial.
5	Muy baja (< 95 %)	Alta indisponibilidad o comportamiento inestable; requiere atención prioritaria.
Impacto en la producción		
Escala	Descripción técnica / Característica	Condición operacional o situación representativa
1	Nulo	Falla sin repercusión en la producción (equipo auxiliar o standby).
2	Bajo	Afecta parcialmente el proceso, con recuperación inmediata o respaldo disponible.
3	Medio	Reducción temporal o parcial de la tasa de producción (< 30 %).
4	Alto	Parada significativa de una línea o subproceso (> 30 % de pérdida).

5	Muy alto	Paro total del proceso o riesgo de incumplir metas anuales de producción.
Redundancia o capacidad de reemplazo		
Escala	Descripción técnica / Característica	Condición operacional o situación representativa
1	Total	Existe equipo redundante o alternativo completamente operativo.
2	Parcial	Redundancia funcional disponible, pero limitada en capacidad o eficiencia.
3	Moderada	Se puede transferir carga entre equipos con ajustes operacionales.
4	Mínima	No existe redundancia directa, solo alternativas operativas con pérdida de capacidad.
5	Nula	Equipo único o cuello de botella sin alternativa de respaldo.
Consecuencias de falla (medio ambiente, económicas y de seguridad)		
Escala	Descripción técnica / Característica	Condición operacional o situación representativa
1	Insignificante	Sin impacto en producción, costos, seguridad ni medio ambiente. Falla menor que se corrige localmente sin afectar la continuidad ni generar residuos o emisiones.
2	Menor	Impacto económico o de tiempo bajo (< 1 h) con afectación mínima. No implica riesgo a personas ni daño ambiental; se gestiona dentro del turno con recursos internos.
3	Moderada	Afecta parcialmente la producción o requiere apoyo externo; pérdidas económicas acotadas y/o emisiones controladas, sin riesgo relevante a personas.
4	Mayor	Pérdida relevante de producción o alto costo de reparación; posible incidente menor de seguridad o liberación ambiental localizada.
5	Crítica	Detención completa del proceso y/o daño ambiental significativo o riesgo alto a la integridad humana; requiere plan de emergencia y/o notificación regulatoria.

Fuente. Elaboración Propia.

Anexo B

Tabla B 1

Análisis de criticidad por activo

Ítem	Equipo	FF	Nivel de disponibilidad	Impacto en la producción	Redundancia o capacidad de reemplazo	Consecuencias de falla (productivas, económicas y de seguridad)	CC	R	JERARQUIZACION
47	2270-CAL-H32	5	4	3	5	4	4	20	Muy Alta Criticidad
11	2255-SER-050	5	2	2	5	4	3	15	Muy Alta Criticidad
15	2255-ELC-137	5	2	1	5	4	3	15	Muy Alta Criticidad
24	2240-CAL-154	5	3	2	2	4	3	15	Muy Alta Criticidad
31	2240-CAL-170	5	3	1	2	4	2	10	Alta Criticidad
74	2237-HAR-243	4	2	1	1	2	2	8	Media Criticidad
81	2237-COR-354	4	2	1	5	3	2	8	Media Criticidad
12	2255-COR-087	3	1	1	5	3	2	6	Media Criticidad
17	2240-COR-173	3	1	1	5	3	2	6	Media Criticidad
32	2240-BBA-567	3	1	1	2	3	2	6	Media Criticidad
37	2270-BBA-P41	3	1	1	4	3	2	6	Media Criticidad
50	2270-EST-33C	3	2	1	4	3	2	6	Media Criticidad
70	2252-VBA-212	3	1	1	5	2	2	6	Media Criticidad
80	2237-COR-436	3	1	1	5	3	2	6	Media Criticidad
95	2260-COR-534	3	1	1	3	3	2	6	Media Criticidad
51	2270-BBA-P33	3	1	1	4	3	2	6	Media Criticidad
5	2255-COR-028	2	1	1	5	3	2	4	Baja Criticidad
6	2255-COR-046	2	1	1	5	3	2	4	Baja Criticidad
10	2255-COR-056	2	1	1	5	3	2	4	Baja Criticidad
16	2240-COR-157	2	1	1	5	3	2	4	Baja Criticidad
42	2270-BBA-P30	2	1	1	4	3	2	4	Baja Criticidad
43	2270-HEX-30A	2	1	1	4	3	2	4	Baja Criticidad
44	2270-HEX-30B	2	1	1	4	3	2	4	Baja Criticidad
52	2270-EST-035	2	1	1	4	2	2	4	Baja Criticidad
79	2237-ELC-238	2	1	1	5	3	2	4	Baja Criticidad
87	2260-COR-494	2	1	1	3	3	2	4	Baja Criticidad
88	2260-ELC-491	2	1	1	3	3	2	4	Baja Criticidad
89	2260-COR-540	2	1	1	3	3	2	4	Baja Criticidad
93	2260-COR-466	2	1	1	3	3	2	4	Baja Criticidad
54	2252-EST-176	3	1	1	1	2	1	3	Media Criticidad
55	2252-EST-177	3	1	1	1	2	1	3	Media Criticidad
56	2252-EST-178	3	1	1	1	2	1	3	Media Criticidad
57	2252-EST-179	3	1	1	1	2	1	3	Media Criticidad
76	2237-HAR-227	3	1	1	1	2	1	3	Media Criticidad
105	2260-SIL-477	3	1	1	1	2	1	3	Media Criticidad
8	2255-VBA-042	1	1	1	5	2	2	2	Baja Criticidad
9	2255-CHU-378	1	1	1	5	2	2	2	Baja Criticidad
13	2255-COR-100	1	1	1	5	2	2	2	Baja Criticidad
14	2255-COR-110	1	1	1	5	2	2	2	Baja Criticidad
18	2240-CHU-126	1	1	1	5	2	2	2	Baja Criticidad
19	2240-COR-129	1	1	1	2	2	2	2	Baja Criticidad
20	2240-EST-13A	1	1	1	2	2	2	2	Baja Criticidad
21	2240-FCA-554	1	1	1	2	2	2	2	Baja Criticidad
22	2240-EST-14A	1	1	1	2	2	2	2	Baja Criticidad
23	2240-BBA-572	1	1	1	2	2	2	2	Baja Criticidad
25	2240-BBA-566	1	1	1	2	2	2	2	Baja Criticidad
26	2240-COR-133	1	1	1	2	2	2	2	Baja Criticidad
27	2240-EST-13B	1	1	1	2	2	2	2	Baja Criticidad

28	2240-FCA-556	1	1	1	2	2	2	2	Baja Criticidad
29	2240-EST-14B	1	1	1	2	2	2	2	Baja Criticidad
30	2240-BBA-571	1	1	1	2	2	2	2	Baja Criticidad
33	2240-EST-021	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
34	2240-EST-040	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
38	2270-EST-021	1	1	1	3	2	2	2	Baja Criticidad
39	2270-BBA-P29	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
40	2270-FCA-F29	1	1	1	5	2	2	2	Baja Criticidad
41	2270-EST-030	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
45	2270-HEX-30C	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
46	2270-HEX-30D	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
48	2270-EST-14A	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
49	2270-EST-14B	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
53	2270-BBA-P35	1	1	1	4	3	2	2	Baja Criticidad
58	2252-EXT-181	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
59	2252-EXT-183	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
60	2252-EXT-185	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
61	2252-EXT-187	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
62	2252-EXT-189	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
63	2252-EXT-191	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
64	2252-EXT-193	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
65	2252-EXT-195	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
66	2252-EXT-197	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
67	2252-EXT-199	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
68	2252-EXT-201	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
69	2252-EXT-203	1	1	1	4	2	2	2	Baja Criticidad
71	2252-COR-235	1	1	1	5	2	2	2	Baja Criticidad
72	2237-ELC-223	1	1	1	5	3	2	2	Baja Criticidad
73	2237-CHU-397	1	1	1	5	2	2	2	Baja Criticidad
77	2237-ENF-231	2	1	1	1	2	1	2	Baja Criticidad
78	2237-CHU-246	1	1	1	5	2	2	2	Baja Criticidad
82	2237-CHU-431	1	1	1	5	2	2	2	Baja Criticidad
84	2260-EST-500	1	1	1	3	2	2	2	Baja Criticidad
85	2260-BBA-970	1	1	1	3	2	2	2	Baja Criticidad
86	2260-TBA-488	1	1	1	3	2	2	2	Baja Criticidad
90	2260-CHU-514	1	1	1	3	2	2	2	Baja Criticidad
91	2260-BBA-972	1	1	1	3	2	2	2	Baja Criticidad
92	2260-TBA-460	1	1	1	3	2	2	2	Baja Criticidad
94	2260-ELC-463	1	1	1	3	3	2	2	Baja Criticidad
96	2260-CHU-472	1	1	1	3	2	2	2	Baja Criticidad
102	2260-SIL-481	2	1	1	1	2	1	2	Baja Criticidad
1	2255-TOL-027	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
2	2255-COR-031	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
3	2255-TOL-035	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
4	2255-COR-039	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
35	2240-BBA-569	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
36	2240-BBA-570	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
75	2237-ENF-247	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
83	2260-ATG-501	1	1	1	2	2	1	1	Baja Criticidad
97	2260-SIL-518	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
98	2260-VAC-898	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
99	2260-COR-543	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
100	2260-SIL-522	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
101	2260-VAC-900	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
103	2260-VAC-481	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
104	2260-COR-537	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad
106	2260-VAC-868	1	1	1	1	2	1	1	Baja Criticidad

Fuente. Elaboración propia.