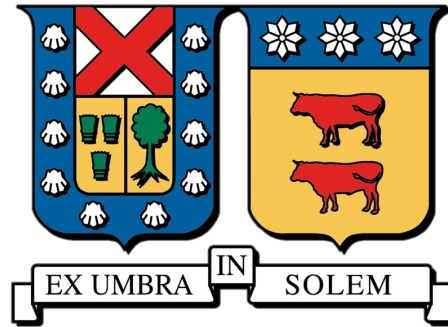




UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS

**DISEÑO DE PLANES DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN
CONFIABILIDAD PARA EQUIPOS CRÍTICOS EN LOS SISTEMAS DE
TRATAMIENTO Y FILTRACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA
EMBOTELLADORA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

AUTOR

MARÍA JESÚS BETTANCOURT MAYO

PROFESOR GUÍA

FREDY KRISTJANPOLLER

PROFESOR CO-REFERENTE

PABLO VIVEROS

VALPARAÍSO, MARZO 2026



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: DISEÑO DE PLANES DE MANTENIMIENTO CENTRADO EN CONFIABILIDAD PARA EQUIPOS CRÍTICOS EN LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y FILTRACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA EMBOTELLADORA

Nombre del candidato(a): MARÍA JESUS BETTANCOURT MAYO

Carrera / Grado: INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL

Campus: CASA CENTRAL

Departamento: INDUSTRIAS

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, FREDY KRISTJANPOLLER RODRIGUEZ, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

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

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

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

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

4.- FIRMAS

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

Fecha: 2 de abril de 2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 6 de abril de 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.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer enormemente a cada persona que haya sido parte de estos largos 6 años. Desde los compañeros y amigos que hice en primer año, con los cuales hacíamos tareas, trabajos y reuniones virtualmente, hasta aquel que se queda en mi vida ahora que hemos finalizado esta etapa, porque las personas entran en nuestras vidas por una razón, aportando algo que debemos aprender.

Le doy mis mayores agradecimientos a mis amigos, Juan Pablo desde primer año, ayudándome, sacándome una risa y apoyarme cuando lo necesitaba hasta las últimas clases junto a David. A Gabriel, desde las clases híbridas siendo compañero de confesiones, chismes y risas a pesar de las vergüenzas que me hacía pasar cuando hablaba de cualquier tema sin importar quien estuviera cerca. A Geraldine, quien puedo catalogar como una persona llena de anécdotas e historias, con la que vez que hablo con ella, a pesar de estar triste, termino con una sonrisa.

A mis amigas, Carry, Cata y Vale, gracias por estos años, de apoyarme cuando lo necesité, prestarme sus hombros para llorar, por sacarme una sonrisa y por siempre preocuparse por como estoy. Gracias por recibirme en el depa cuando tenía ventanas muy largas, una que otra noche en la que me alojé, los almuerzos juntas y las sesiones de estudio.

A mis amigas Fer, Coni y Muriel, quienes me acompañan desde pequeñas todas desde diferentes lugares. Gracias por ser amistades que traspasan los años, quienes me han visto crecer y yo a ustedes, y que a pesar de la distancia, sé perfectamente que el cariño y la amistad perdura.

A mi abuela Carmen quien me vió crecer y me cuidaba cuando tanto mi papa como mi mamá trabajaban, quién me ayudó a ser quien soy hoy en día y forjó en mi un entorno de cariño y amor hasta el día de hoy recibéndome siempre con sus brazos abiertos cuando lo necesito.

A mi abuela Ana, que a pesar de todo me quedo con cómo la aproveché en mi niñez, sacándome risas y enseñándome quizá a veces chistes inapropiados. Si bien hay días en los que no me reconoce, sigue con sus chistes a veces ordinarios, tallas que sólo a ella se le ocurren y se perfectamente que en su interior están todos los recuerdos de los momentos vividos juntas.

A mi Mamá y Papá. Gracias a mi mamá por siempre preocuparse de mí, de tenerme almorzo u once para llevar o cuando llegaba a casa, de cuidarme cuando me enfermaba. Si bien a veces peleamos por tonteras, que sepas que siempre te agradeceré por como me criaste para bien y para apoyarte cuando más lo necesites. Y a mi papá, que con su esfuerzo a crecido y logró desde siempre dármele todo para que nunca me faltara nada. Esto lo logro gracias a su sacrificio y el cierre de esta etapa se las debo a nadie mas que a ustedes.

Por último a los demás amigos, familiares y cercanos a mi familia. Todos son un pedacito de lo que soy y agradezco cada etapa vivida, de quienes me han visto reír, llorar y celebrar incluso las personas que hoy en día ya no estén en mi vida.

Resumen

La presente memoria de título desarrolla una propuesta de diseño y mejora de planes de mantenimiento para equipos críticos participantes en los sistemas de tratamiento y filtración de agua de una planta embotelladora, considerando el impacto que la indisponibilidad de estos activos genera sobre la continuidad operacional del área de suministros y sobre indicadores globales de desempeño como disponibilidad, eficiencia y OEE.

El estudio se enmarca en una investigación aplicada de carácter descriptivo, correlacional y explicativo, orientada a fortalecer la gestión de activos físicos mediante metodologías de confiabilidad. Para ello, se estructuró una metodología en cinco fases que incluyó el levantamiento del contexto operacional, evaluación de criticidad de equipos, análisis de modos y efectos de falla (AMEF), selección de estrategias de mantenimiento mediante lógica de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) y diseño de propuestas de planes de mantenimiento.

A partir de una matriz de criticidad semicuantitativa se priorizaron los sistemas de inyección de cloro, desinfección ultravioleta, abatimiento de arsénico y ultrafiltración, incluyendo tanto equipos existentes como activos nuevos asociados al proyecto Master Plan de Agua 2025. Posteriormente, se identificaron funciones, fallas funcionales, modos de falla, causas y efectos, permitiendo jerarquizar modos críticos mediante el Número de Prioridad de Riesgo (NPR).

Sobre la base de los resultados obtenidos, se definieron estrategias de mantenimiento técnicamente justificadas, incorporando tareas preventivas, predictivas, correctivas planificadas y propuestas de rediseño según las consecuencias de cada modo de falla y la factibilidad de intervención bajo lógica RCM.

El estudio entrega una propuesta técnica orientada a mejorar la disponibilidad operativa

de los sistemas analizados, fortalecer la estandarización de los planes de mantenimiento y aportar una base metodológica de operación para futuras decisiones de gestión de activos dentro de la organización.

Palabras clave — mantenimiento centrado en confiabilidad, AMEF, criticidad, gestión de activos, disponibilidad, OEE, planta de agua.

Abstract

This thesis develops a proposal for the design and improvement of maintenance plans for critical equipment involved in water treatment and filtration systems in a bottling plant, considering the impact that equipment unavailability has on the operational continuity of the supply area and on key performance indicators such as availability, efficiency, and OEE.

The study is framed as an applied research project with a descriptive, correlational, and explanatory scope, aimed at strengthening physical asset management through reliability-based methodologies. A five-phase methodology was structured, including operational context assessment, equipment criticality evaluation, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), maintenance strategy selection through Reliability-Centered Maintenance (RCM) logic, and the design of maintenance plan proposals.

Based on a semi-quantitative criticality matrix, the systems prioritized for analysis were chlorine injection, ultraviolet disinfection, arsenic removal, and ultrafiltration, including both existing equipment and new assets associated with the Water Master Plan 2025 project. Functions, functional failures, failure modes, causes, and effects were identified, allowing critical failure modes to be prioritized through the Risk Priority Number (RPN).

Based on the obtained results, technically justified maintenance strategies were defined, incorporating preventive, predictive, planned corrective tasks, and redesign proposals according to the consequences of each failure mode and the technical feasibility of intervention under RCM logic.

This study provides a technical proposal aimed at improving the operational availability of the analyzed systems, strengthening maintenance plan standardization, and providing a methodo-

logical basis for future asset management decisions within the organization.

Keywords — reliability-centered maintenance, FMEA, criticality, asset management, availability, OEE, water treatment plant.

Tabla de Contenidos

1	Introducción	12
2	Problema de Investigación	14
3	Objetivos	21
3.1	Objetivo General	21
3.2	Objetivos Específicos	21
4	Alcance	22
5	Marco Teórico	24
5.1	Conceptos Fundamentales de Mantenimiento	24
5.2	Gestión de Activos Físicos y el Mantenimiento	28
5.3	RCM	40
5.4	Relación entre RCM y AMEF/FMECA	49
5.5	Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF/FMECA)	51
5.6	Análisis de Criticidad de Equipos	52
5.7	Planta Potabilizadora de Agua	53
6	Metodología	57
6.1	Fase 1: Contexto Operacional y Definición de Sistemas	58
6.2	Fase 2: Evaluación de Criticidad y Priorización de Análisis	59
6.3	Fase 3: Análisis de Modos y Efectos de Falla	67
6.4	Fase 4: Selección de Estrategias de Mantenimiento	73

6.5	Fase 5: Diseño y Mejora de Planes de Mantenimiento	75
7	Resultados	79
7.1	Contexto Operacional y Definición de Sistemas	79
7.2	Evaluación de Criticidad de Equipos	87
7.3	Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF)	95
7.4	Selección de Estrategias de Mantenimiento	112
7.5	Propuestas de Planes de Mantenimiento	117
7.6	Recomendaciones y Trabajos Futuros	121
8	Conclusiones	123
	Anexos	125
A	Planta Ultrafiltración	125
B	Componentes Ultrafiltración	126
C	AMEF del Sistema de Inyección de Cloro	129
D	AMEF del Sistema UV	132
E	AMEF del Sistema Abatidor de arsénico	136
F	AMEF del Sistema de Ultrafiltración	139

Lista de Tablas

1	Matriz de Evaluación de Criticidad de Equipos	66
2	Formato para el Desglose Jerárquico de Equipos	69

3	Formato para la Hoja de Trabajo de Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF)	71
4	Escala de Evaluación de Severidad (S)	71
5	Escala de Evaluación de Ocurrencia (O)	72
6	Escala de Evaluación de Detectabilidad (D)	72
7	Sistemas y equipos considerados en la evaluación de criticidad	88
8	Matriz de Evaluación de Criticidad	90
9	Equipos clasificados con criticidad alta (A)	91
10	Equipos considerados en la evaluación de criticidad específica para el sistema de ultrafiltración	93
11	Matriz de Evaluación de Criticidad Interna del Sistema de Ultrafiltración	93
12	Equipos clasificados con criticidad alta (A) para Ultrafiltración	94
13	Equipos resultantes de la evaluación de criticidad, para análisis AMEF	96
14	Desglose jerárquico del sistema de inyección de cloro	98
15	Fallas Funcionales Sistema de Inyección de Cloro	99
16	Modos de Falla Críticos del Sistema de Inyección de Cloro	100
17	Desglose Jerárquico del Sistema de Desinfección UV	102
18	Fallas Funcionales Sistema de Desinfección UV	103
19	Modos de Falla Críticos del Sistema de Desinfección Ultravioleta (UV)	103
20	Desglose jerárquico del sistema de abatimiento de arsénico	106
21	Fallas Funcionales Sistema de abatimiento de arsénico	106
22	Modos de Falla Críticos del Sistema de Abatimiento de Arsénico	107
23	Desglose jerárquico del sistema de ultrafiltración	110
24	Fallas Funcionales Sistema de ultrafiltración	111

25	Modos de Falla Críticos del Sistema de Ultrafiltración	111
26	Estrategias de mantenimiento para el sistema de inyección de cloro	113
27	Estrategias de mantenimiento para el sistema de desinfección ultravioleta	114
28	Estrategias de mantenimiento para el sistema de abatimiento de arsénico	115
29	Estrategias de mantenimiento para el sistema de ultrafiltración	116
30	Plan de mantenimiento propuesto para el sistema de inyección de cloro	118
31	Plan de mantenimiento propuesto para el sistema de desinfección UV	119
32	Plan de mantenimiento propuesto para el sistema de abatimiento de arsénico	119
33	Plan de mantenimiento propuesto para el sistema de ultrafiltración	120
34	Hoja de trabajo AMEF del sistema de inyección de cloro (Parte 1)	130
35	Hoja de trabajo AMEF del sistema de inyección de cloro (Parte 2)	131
36	Hoja de trabajo AMEF del sistema de desinfección ultravioleta UV (Parte 1)	133
37	Hoja de trabajo AMEF del sistema de desinfección ultravioleta UV (Parte 2)	134
38	Hoja de trabajo AMEF del sistema de desinfección ultravioleta UV (Parte 3)	135
39	Hoja de trabajo AMEF del sistema de abatidor de arsénico (Parte 1)	137
40	Hoja de trabajo AMEF del sistema de abatidor de arsénico (Parte 2)	138
41	Hoja de trabajo AMEF del sistema de ultrafiltración (Parte 1)	140
42	Hoja de trabajo AMEF del sistema de ultrafiltración (Parte 2)	141
43	Hoja de trabajo AMEF del sistema de ultrafiltración (Parte 3)	142
44	Hoja de trabajo AMEF del sistema de ultrafiltración (Parte 4)	143
45	Hoja de trabajo AMEF del sistema de ultrafiltración (Parte 5)	144

Lista de Figuras

1	Indicadores Globales Planta Embotelladora	16
---	---	----

2	Indicadores Globales Planta Embotelladora - Área Suministro	17
3	Recuento de de pérdidas por equipo detenido	18
4	Diagrama Explicativo Metodología	77
5	Diagrama de Flujo Planta de Agua	84
6	Diagrama de Flujo Planta de Agua Proyecto Master Plan	84
7	Trazabilidad metodológica	95
8	Modo de trabajo sección AMEF	97
9	Plano Planta Ultrafiltración	125
10	Equipos de contenedores de ultrafiltración	127
11	Equipos del contenedor de control de ultrafiltración	128

1 Introducción

En la industria embotelladora, la continuidad operacional depende de manera directa de la disponibilidad de sistemas auxiliares capaces de asegurar el suministro permanente de recursos esenciales para la producción. Entre ellos, la planta de tratamiento y filtración de agua cumple un rol estratégico, ya que proporciona el recurso hídrico necesario tanto para la elaboración de bebidas como para actividades de limpieza, procesos auxiliares y soporte general a las líneas productivas.

En un contexto marcado por mayores exigencias de eficiencia operacional, restricciones asociadas a la disponibilidad hídrica y necesidad de mantener altos niveles de confiabilidad en los activos físicos, la gestión de mantenimiento adquiere un carácter determinante para asegurar el desempeño del sistema completo. La indisponibilidad de equipos críticos en sistemas de tratamiento de agua no solo afecta el funcionamiento local del área de suministros, sino que también puede limitar la capacidad productiva global de la planta, impactando indicadores operacionales como disponibilidad, eficiencia y OEE.

Adicionalmente, la incorporación de nuevos activos tecnológicos asociados al proyecto Master Plan de Agua 2025 introduce nuevos desafíos para la gestión de mantenimiento, particularmente debido a la coexistencia con equipos existentes, la ausencia de historial de fallas en ciertos activos nuevos y la necesidad de establecer criterios técnicos consistentes para la definición de planes de mantenimiento desde etapas tempranas de operación.

Frente a este escenario, resulta necesario adoptar metodologías que permitan priorizar activos, comprender sus modos de falla y seleccionar estrategias de intervención técnicamente justificadas. En este contexto, el uso combinado de análisis de criticidad, Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) y Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) permite estructurar una

propuesta orientada a fortalecer la gestión de activos físicos y mejorar la toma de decisiones en mantenimiento.

La presente memoria de título desarrolla una investigación aplicada orientada al diseño y mejora de planes de mantenimiento para equipos críticos de la planta de agua de una embotelladora, abordando sistemas de inyección de cloro, desinfección ultravioleta, abatimiento de arsénico y ultrafiltración. A partir de un análisis secuencial que considera criticidad, modos de falla y lógica de decisión RCM, se formulan propuestas técnicas de mantenimiento preventivo, predictivo, correctivo planificado y rediseño, orientadas a fortalecer la disponibilidad operativa de los sistemas analizados y aportar una base metodológica para futuras decisiones de gestión de activos dentro de la organización.

2 Problema de Investigación

En la industria embotelladora, las empresas enfrentan crecientes problemáticas asociadas a la escasez hídrica para la producción de bebidas y fallas potenciales en sus procesos productivos. Esto ha incrementado la importancia de implementar un mantenimiento preventivo adecuado, evaluar el impacto de las fallas en la seguridad y el medio ambiente, comprender la relación entre mantenimiento y calidad del producto, y responder a la presión por alcanzar una alta disponibilidad en la planta manteniendo los costos controlados (Moubray, 1997).

En este contexto, la gestión de activos físicos se vuelve un factor estratégico, ya que permite dirigir, coordinar y controlar las actividades de mantenimiento, proporcionando un mejor control del riesgo y asegurando el cumplimiento de los objetivos organizacionales sobre una base coherente de confiabilidad (International Organization for Standardization, 2014a). Esto favorece la transición desde prácticas reactivas hacia enfoques más estructurados y predictivos, orientados a optimizar la relación entre costo, riesgo y desempeño a lo largo del ciclo de vida de los activos.

Ante el escenario actual de escasez hídrica, la organización ha definido un plan de actualización tecnológica de sus procesos mediante el proyecto "Master Plan de Agua 2025" pensado para el segundo semestre del 2025. Este proyecto del área Suministros considera la incorporación de nuevos equipos con el objetivo de aumentar la capacidad y optimizar el proceso de extracción y tratamiento de agua, recurso esencial tanto para la elaboración de bebidas como para los procesos productivos asociados.

Paralelamente, la empresa busca realizar una transformación estratégica de su enfoque de mantenimiento, pasando desde un modelo predominantemente correctivo hacia uno preventivo basado en la metodología de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). No obstante su

implementación se ve condicionada al contexto operativo actual de la planta, dada la coexistencia de equipos antiguos con los nuevos incorporados, la limitada e ineficiente calidad de información en cuanto al historial de fallas de algunos activos y baja estandarización de los planes de mantenimiento.

Actualmente el enfoque correctivo dificulta la predicción de fallas debido a un escaso monitoreo de los equipos, baja calidad de datos registrados e inspecciones en terreno poco eficaces. Esto impide un análisis confiable de indicadores como MTBF y disponibilidad desde una perspectiva a largo plazo.

En el caso de la planta embotelladora de esta investigación, cuenta con su propia planta de tratamiento y abastecimiento de agua, la cual permite suministrar el recurso hídrico necesario para procesos de elaboración de bebidas, procedimientos de limpieza y uso directo en todas las líneas de producción.

La incorporación de nuevos equipos tales como equipos uv, analizadores de cloro y sistemas de ultrafiltración destinados a optimizar y reemplazar parcialmente el actual sistema de nanofiltración, introduce un desafío adicional dado que algunos de ellos no poseen actual plan de mantenimiento ni historial de operación en planta y se integran a un sistema que se ha visto superado tanto en cuanto capacidad y su propia gestión de mantenimiento.

Desde una perspectiva cuantitativa, cuando el tiempo de parada de equipos supera los tiempos esperados de reparación, afectan directamente la capacidad productiva, incrementan los costos operacionales y deterioran la capacidad de producción, existiendo un aumento en los costos operacionales y deteriora el servicio. Dicho tiempo impacta negativamente en el OEE (Overall Equipment Effectiveness), indicador clave que mide la eficiencia global de una máquina, línea de producción o planta completa (Sistemas OEE, 2025).

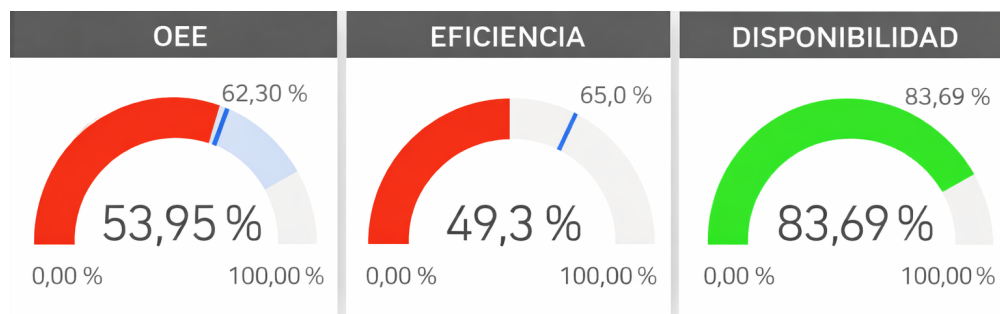
Dado el escenario de escasez hídrica, el suministro continuo y confiable de agua se vuelve crítico para la operación, por lo que una mala gestión de los activos asociados del sistema se traduce en ineficiencia e indisponibilidad de la planta de agua, afectando directamente la continuidad productiva y el OEE de la empresa.

Además, existen brechas en la gestión de equipos, falta de estandarización en las mantenimientos y coexistencia de equipos antiguos con los nuevos, lo que incrementa la variabilidad operativa del sistema. Esta situación se refleja en indicadores como el OEE, la eficiencia y disponibilidad, los cuales presentan niveles por debajo de los valores objetivos definidos por la organización, evidenciando una alta incidencia de paradas no planificadas asociadas a fallas de equipos tanto de los relacionados a la extracción y tratamiento de agua como de las líneas de producción.

En relación con los indicadores globales de desempeño que se adjuntan en la Figura 1, al comparar los valores del sistema completo con aquellos obtenidos exclusivamente para el área de suministros a continuación en la Figura 2, se observa que este subsistema presenta un desempeño inferior a modo general, donde los indicadores a destacar son OEE, eficiencia y disponibilidad, por lo que se presenta como un cuello de botella del sistema productivo y un foco prioritario de intervención.

Figura 1

Indicadores Globales Planta Embotelladora



Nota. Indicadores Globales Planta Embotelladora contabilizando todos los procesos operativos para la pro-

ducción de un turno típico.

Figura 2

Indicadores Globales Planta Embotelladora - Área Suministro



Nota. Indicadores Globales Planta Embotelladora contabilizando únicamente área Suministros para la producción de un turno típico.

Si bien el OEE presenta una disminución cercana al 1 %, este valor resulta poco representativo del impacto real del sistema de suministros, dado que su indisponibilidad afecta directamente a las líneas de producción y otros sistemas, actuando como un factor limitante del desempeño global. Adicionalmente, la eficiencia del sistema de suministros es aproximadamente un 13 % inferior a la del sistema completo, lo que evidencia su influencia negativa sobre la continuidad operacional. Por su parte y lo más importante, la disponibilidad presenta una disminución cercana al 19 %, reflejando una mayor proporción de tiempo fuera de condiciones óptimas de operación.

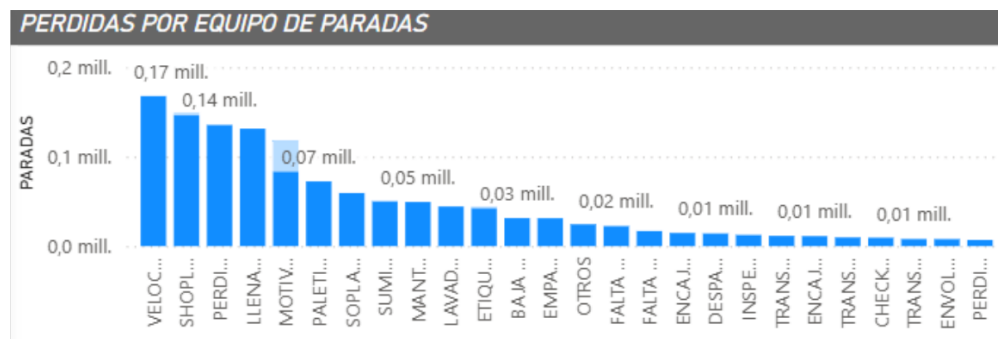
A partir de lo anterior, vemos que una disminución en la disponibilidad del sistema de tratamiento de agua implica una reducción en el caudal de agua tratada, lo cual se traduce directamente en una menor cantidad de bebidas producidas. Esta disminución productiva representa pérdidas económicas asociadas tanto a la reducción de ventas como al aumento de costos por ineficiencia operacional. En este sentido, la problemática no solo tiene un impacto técnico, sino también financiero y estratégico para la organización.

Respecto de la concentración de pérdidas en el sistema de suministros, en la Figura 3 se

observa que los equipos asociados a este proceso se ubican entre los principales generadores de detenciones dentro del conjunto de más de 27 equipos o áreas relevantes, reforzando su condición de subsistema crítico para la operación de la planta.

Figura 3

Recuento de de pérdidas por equipo detenido



Nota. Recuento de pérdidas por detenciones de equipos agrupados por área o sistema de donde proviene la pérdida.

En el contexto de mantenimiento, los datos históricos evidencian la existencia de fallas graves de baja ocurrencia y fallas leves pero frecuentes. Esto nos indica que las fallas leves se asocian principalmente a desgaste, inestabilidad operacional y mantenimiento mal orientado, mientras que las fallas graves poco frecuentes presentan un alto riesgo operativo y posibilidad eventos catastróficos.

Este comportamiento del sistema solo sería aceptable bajo un esquema donde las fallas leves se mantengan en niveles mínimos y las fallas graves se encuentren debidamente controladas o mitigadas. Sin embargo, el escenario actual evidencia la ausencia de un plan de mantenimiento diferenciado según la naturaleza de cada falla y criticidad de los distintos modos de falla probables, lo que impide una gestión efectiva del riesgo y de la recurrencia de detenciones.

Desde una perspectiva temporal, el sistema de suministro de agua permanece cerca del 35 % del tiempo fuera de condiciones operativas adecuadas, lo que reduce el caudal total disponible

para los procesos productivos. Esta situación se traduce directamente en una disminución de la capacidad de producción, lo que puede expresarse como menos agua tratada, menor volumen de bebidas elaboradas y, en consecuencia, menores ingresos para la organización.

Esta situación aclara la necesidad de rediseñar los planes de mantenimiento a partir del comportamiento real del sistema, enfocándose en tácticas diferenciales que permitan intervenir de forma anticipada y correcta sobre los equipos críticos. En el caso de los equipos nuevos, la aplicación temprana de estrategias como RCM2 y Análisis de Modo de Fallas y Efectos (AMEF) permite mitigar fallas a lo largo de toda su vida útil, superando el enfoque limitado de los manuales técnicos y considerando múltiples escenarios de falla potencial. Esto permite mejorar el OEE al abordar directamente problemáticas como la disponibilidad y productividad de los equipos. Sin embargo, muchas organizaciones aún no logran consolidar una cultura de confiabilidad, priorizando acciones correctivas por sobre la planificación adecuada, lo que dificulta la transición hacia modelos preventivos y predictivos realmente efectivos.

Es por ello que para afrontar la creación y rediseño de planes, el enfoque RCM2 propuesto por Moubray establece un marco metodológico para identificar funciones críticas, evaluar modos de falla y diseñar estrategias de intervención adecuadas. Bajo este escenario, la investigación busca dar respuesta a la siguiente interrogante: ¿Cómo contribuye la aplicación combinada de AMEF y RCM a la identificación de fallas críticas y a la propuesta de estrategias de mantenimiento orientadas a reducir la indisponibilidad de equipos en la planta de tratamiento de agua?

La base cuantitativa descrita proporciona el sustento necesario para un análisis el comportamiento de fallas, donde se poseen escenarios principales como fallas graves y poco ocurrentes como también fallas leves pero constantes. Los datos demuestran que la aplicación del plan de mantenimiento actual no es del todo eficiente, donde el rediseño del plan debe estructurarse en

la estandarización en la forma de crear un plan, pero enfocándose en tácticas diferenciadas que respondan a la naturaleza específica de cada posible modo de falla.

La presente investigación se justifica en la necesidad de garantizar la continuidad operacional de la planta de agua de la empresa embotelladora, viéndose afectado especialmente en disponibilidad respecto al área de suministros en el abastecimiento interno de recursos hídricos y en la eficiencia global de la compañía medida en los indicadores globales, como también parte por el área de mantenimiento para mantener correctamente los activos en sus condiciones operacionales. El escenario de escasez hídrica refuerza aún más la importancia de contar con una gestión de mantenimiento robusta, capaz de asegurar un suministro confiable y sostenido.

Desde una perspectiva metodológica, el uso de RCM y AMEF proporciona un marco estructurado y validado internacionalmente para la evaluación de criticidad y la formulación de planes de mantenimiento basados en la confiabilidad. Estas herramientas permiten avanzar desde un enfoque reactivo hacia uno preventivo y predictivo, sustentado en la identificación sistemática de modos de falla y en la definición de acciones técnicas orientadas a incrementar la disponibilidad de los equipos.

El impacto esperado se refleja principalmente en la mejora del OEE, a través de la reducción de la indisponibilidad, el aumento del MTBF y la disminución del MTTR, fortaleciendo la productividad, la calidad y la seguridad operacional. De este modo, la investigación contribuye tanto a la mejora del desempeño organizacional como al desarrollo de prácticas sostenibles y eficientes en la gestión de activos críticos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Diseñar un plan de mantenimiento para los equipos críticos de la planta de agua, utilizando las metodologías AMEF junto a criticidad para cumplir con el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, con el propósito de entregar una propuesta técnica completa con correcta base metodológica.

3.2 Objetivos Específicos

1. Definir los criterios técnicos para la evaluación de la criticidad de los equipos de la planta de agua.
2. Identificar y jerarquizar los equipos críticos mediante una matriz de riesgo basada en los criterios definidos.
3. Aplicar la metodología AMEF para analizar los modos de falla, sus causas y efectos en los equipos críticos.
4. Diseñar y/o actualizar planes de mantenimiento para los equipos críticos, orientados a incrementar su disponibilidad operativa.

4 Alcance

El presente estudio se enfoca, en una primera instancia, en realizar un análisis de criticidad y, posteriormente, un análisis de modos y efectos de falla, con la finalidad de diseñar y mejorar los planes de mantenimiento para los activos de la planta de agua de la embotelladora. El análisis se centra en los equipos del proyecto *Master Plan de Agua 2025* y una selección de los equipos existentes que son de alta criticidad.

El desarrollo del estudio considera el levantamiento de información mediante observación directa en terreno, entrevistas con personal clave y análisis documental de planes, manuales y relaciones funcionales entre los diferentes equipos de la planta.

El alcance temporal del estudio comprende el segundo semestre del año 2025, cubriendo desde un análisis de los procesos de la planta de agua, participar en capacitaciones de los equipos nuevos, recopilar información de modos de falla posibles identificados por los proveedores y analizar detalladamente los equipos en actual funcionamiento en planta con personal experto.

En cuanto al desarrollo metodológico, el estudio considera identificar y delimitar los sistemas y equipos a analizar mediante la creación de una matriz de criticidad semi-cuantitativa basada en criterios clave otorgados por la empresa. A partir de esta matriz, se clasificarán los equipos del proyecto y algunos existentes en la planta para la priorización del análisis. Posteriormente, se ejecutará un análisis AMEF que incluirá funciones, modos de falla, causas y efectos, exclusivamente en los activos identificados como críticos y cuyos resultados serán utilizados como base para la selección de estrategias de mantenimiento mediante la lógica de decisión del enfoque RCM. Finalmente, se propondrá el diseño de nuevos planes de mantenimiento y la optimización de los planes existentes, mediante la aplicación de la lógica de decisión del enfoque RCM.

Dado que se trata de un estudio con enfoque técnico y operativo, se excluyen actividades como cuantificación económica de los planes, la compra de herramientas necesarias para llevar a cabo las actividades de mantenimiento, la actualización de los planes de mantenimiento en el sistema, la implementación de dichas propuestas, seguimiento de la ejecución de las tareas o actividades seleccionadas. Asimismo, se excluye la implementación de rediseños de equipos o procesos, limitándose el estudio únicamente a su identificación y propuesta técnica cuando corresponda.

En cuanto al entregable final, considera la jerarquización de los equipos según su nivel de criticidad, el desarrollo del análisis de AMEF de los equipos críticos y la propuesta de diseño y rediseño de planes de mantenimiento. En consecuencia, el alcance del conocimiento generado llega hasta la explicación y justificación técnica de un plan de mantenimiento, definiendo este trabajo como diagnóstico técnico acompañado de propuestas de mejora.

Finalmente, el trabajo desarrollado puede describirse como una investigación de tipo descriptiva, correlacional y con un alcance final explicativo. Es descriptiva porque se busca caracterizar los activos, clasificarlos y describir sus modos de falla, causas y efectos. Es correlacional, puesto que analiza la relación entre los equipos mediante la evaluación de criticidad basada en criterios definidos y cuantificados, así como la relación entre las variables severidad, ocurrencia y detectabilidad para la obtención del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Por último, presenta un alcance explicativo, ya que pretende comprender por qué ocurren los fenómenos de falla, considerando que el AMEF no solo describe los eventos, sino que identifica causas raíz y orienta la definición de acciones de mantenimiento para prevenir su recurrencia.

Asimismo, los resultados del estudio se circunscriben al contexto operacional de la planta de agua analizada, por lo que su aplicación en otras instalaciones deberá considerar las particularidades técnicas y operativas de cada sistema.

5 Marco Teórico

El presente capítulo establece el marco conceptual y estratégico que sustenta el desarrollo de la metodología RCM, considerando los equipos de la planta de agua como activos físicos críticos cuya gestión adecuada es vital para el cumplimiento de los objetivos corporativos. Este enfoque se encuentra alineado con los principios de la norma ISO 55000, norma SAE JA1011 y la metodología RCM2.

5.1 Conceptos Fundamentales de Mantenimiento

Definición de Mantenimiento

El mantenimiento se define como el acto de asegurar que los activos de la planta que sean físicos continúen en sus operaciones como los usuarios lo requieran, conservando su estado (Moubray, 1997).

Esta definición se relaciona con las acepciones encontradas en diccionarios importantes que definen mantener como causar que continúe (Oxford), conservar su estado existente (Webster), o conservar cada cosa en su ser (Real Academia Española) (Moubray, 1997).

Desde una perspectiva organizacional, la finalidad de la mantención es conservar y valorizar los bienes que constituyen el patrimonio activo fijo de una empresa, donde el objetivo se centra en conservar estos activos durante toda su vida útil, donde debe asegurar eliminar o mitigar puntos críticos, siempre respetando la seguridad del personal y protección al medioambiente (Arata, 2005).

Bajo este enfoque, el mantenimiento entonces puede tratarse como disciplina estratégica orientada a la funcionalidad de los activos, donde se busca garantizar el cumplimiento de paráme-

tros de desempeño, seleccionar políticas adecuadas para manejo de fallas y alinearse acorde a los estándares de confiabilidad y seguridad propios de la industria. Considerar esta perspectiva permite comprender la relevancia del mantenimiento en el contexto de la industria moderna.

Evolución e Importancia del Mantenimiento en la Industria Moderna

La noción de mantenimiento adquiere relevancia en la industria a partir de la Revolución Industrial, dado el comienzo de fabricación de equipos y máquinas complejas, lo cual crea la necesidad de cuidar las partes que los componen y asegurar su funcionamiento continuo. En los inicios, no existía un orden o procedimiento establecido para realizar un mantenimiento, por lo que las acciones se desarrollaban en base a la experiencia práctica, dando origen progresivamente a técnicas, herramientas necesarias, análisis de fallas y distintos tipos de mantenimiento. Con el pasar de los años, ha experimentado una evolución significativa especialmente desde la década de 1930 (Moubray, 1997).

Durante la primera generación contemplada hasta la Segunda Guerra Mundial, la industria no estaba altamente mecanizada, por lo que las detenciones de los equipos no eran una preocupación mayor, donde la mayoría de los equipos eran simples y fáciles de reparar. En este período, las actividades de mantenimiento se limitaban a tareas básicas como limpieza y lubricación. En la segunda generación, impulsada por las exigencias asociadas a la Segunda Guerra Mundial, aumentó la mecanización. En la segunda generación con la presión de la Segunda Guerra Mundial, provocó un aumento drástico de mecanización, dando lugar al concepto de mantenimiento preventivo. A partir de mediados de la década de 1970, esta tendencia aumentó, incorporándose enfoques más sistemáticos orientados a la confiabilidad, entre los cuales el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) se consolidó como un eje fundamental (Moubray, 1997).

Como consecuencia de esta evolución, las expectativas organizacionales respecto a mantenimiento se ampliaron, abarcando disponibilidad, confiabilidad, calidad del producto, costo-eficacia, seguridad e integridad ambiental, entre otros conceptos fundamentales (Moubray, 1997).

En este contexto, se reconocen los siguientes principios esenciales asociados al mantenimiento:

Enfoque en la función. El estado debe perdurar y continuar en base a lo que se requiera que haga el activo, donde normalmente el activo hace más de lo que el activo es (Moubray, 1997).

Manejo de las Fallas. El mantenimiento cumple sus objetivos al adoptar una política correcta para el manejo de una falla, las cuales incluyen tareas basadas en condición, reacondicionamiento programado, sustitución cíclica, búsqueda sistemática de fallas, mantenimiento correctivo y rediseño (Moubray, 1997).

Evolución del enfoque. Desde la década de 1970, el mantenimiento ha incorporado progresivamente criterios de disponibilidad, confiabilidad, seguridad, calidad del producto y costo-efectividad. En este marco, el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM) se consolida como una filosofía que proporciona una estructura metodológica estratégica acorde a las exigencias de la industria moderna (Moubray, 1997).

Estrategias de Mantenimiento

A medida que el mantenimiento ha evolucionado, surge la necesidad de adoptar estrategias que se ajusten a distintos escenarios productivos y condiciones operacionales. En la teoría especializada, los términos asociados a las estrategias de mantenimiento suelen utilizarse indistin-

tamente, aun cuando representan enfoques con objetivos y alcances diferentes. En este contexto, es posible identificar las siguientes categorías de estrategias de mantenimiento aplicables a activos industriales:

Mantenimiento Correctivo. También conocido como Run to Failure (RTF), consiste en intervenir el equipo únicamente después de que ocurre la falla y reparar lo dañado y restituir su condición operativa. Este enfoque se da en escenarios caracterizados de baja planificación de mantenimiento y excesivos niveles de inventario de repuestos y mano de obra como manera de resguardar la continuidad de los procesos productivos (Arata, 2005). No obstante, esta estrategia es insostenible en el tiempo e ineficiente, ya que se representa altos costos de reparación y pérdidas significativas de producción.

Mantenimiento Preventivo. Esta estrategia busca reducir la probabilidad de ocurrencia de fallas mediante la ejecución programada de actividades de mantenimiento, donde su objetivo es reducir probabilidad de ocurrencia de falla evitando detenciones repentinas en la producción. Esta estrategia permite planificar dichas intervenciones y anticipar los recursos necesarios. Además como se enfoca en la reducción de ocurrencia de fallas, esto contribuye a disminuir los costos de falla y también aumenta la seguridad de los operadores (Arata, 2005).

Mantenimiento Predictivo. Corresponde a una estrategia complementaria al mantenimiento preventivo, cuyo enfoque se basa en el monitoreo de parámetros representativos del proceso y del estado de los activos. Esta estrategia es representativa cuando existe un equipo o proceso que presenta valores variables en el tiempo que exceden los límites aceptables de operación. Para su implementación, es necesario definir previamente rangos de funcionamiento aceptables de ope-

ración y realizar un seguimiento sistemático que permita predecir la condición futura del equipo (Arata, 2005).

Mantenimiento Proactivo. Se define como estrategia que busca identificar y eliminar la causa raíz de los fallos antes que causen daño o averías en los activos. Este enfoque contribuye a aumentar la productividad al mejorar el rendimiento sin interrumpir la operación, asegurando un uso óptimo de los activos dentro de su vida útil. A diferencia del mantenimiento preventivo, no se basa en rutinas fijas, sino que en el análisis de datos y comportamiento histórico de fallas, lo que implica una frecuencia de intervención variable (SafetyCulture Content Team, 2024).

Mantenimiento Mejorativo. Esta estrategia se basa en modificar equipos o sistemas con el fin de mejorar la disponibilidad y adecuarlos de mejor forma a los niveles de producción requeridos. Esto implica evaluar proyectos de inversión que asociados al reemplazo por equipos más sofisticados o incorporación de redundancias en los procesos productivos para que el sistema no se detenga. En algunos casos, las mejoras pueden ser solamente la reconfiguración del *Flow Sheet* de un proceso o planta, con el objetivo de aumentar la disponibilidad de subsistemas críticos que limitan actualmente la producción (Arata, 2005).

5.2 Gestión de Activos Físicos y el Mantenimiento

De acuerdo con la norma International Organization for Standardization (2014a), la gestión de activos físicos se define como el conjunto de prácticas coordinadas orientadas a obtener valor de los activos a lo largo de su ciclo de vida. Esta norma establece los principios, requisitos y terminología para implementar un sistema de gestión de activos eficaz.

La gestión de activos implica una visión integral de la infraestructura industrial, conside-

rando desde la adquisición hasta la disposición final de los activos. En este sentido, constituye una función estratégica dentro del sistema productivo, al mismo nivel que la gestión de la producción, la calidad, el medio ambiente y los recursos humanos (Arata, 2005). Su objetivo principal es apoyar el cumplimiento de los objetivos organizacionales mediante decisiones técnicas y económicas basadas en el equilibrio entre desempeño, costo y riesgo.

Pilares de la Gestión de Activos

El enfoque de la gestión de activos propuesto por la International Organization for Standardization (2014a) se basa en cuatro pilares fundamentales:

Valor. La gestión de activos se fundamenta en la capacidad de los activos para generar valor para la organización y sus partes interesadas. En este sentido, resulta clave traducir los objetivos organizacionales en decisiones, planes y actividades coherentes que permitan alcanzar un equilibrio entre costo, riesgo y desempeño. Este valor no se limita únicamente al ámbito financiero, sino que también incluye aspectos intangibles como la reputación corporativa y el cumplimiento normativo. El valor se materializa cuando los objetivos de la gestión de activos, como el aumento de la confiabilidad, se alinean con metas estratégicas tales como la continuidad operativa y la calidad del producto final.

Alineación. Este pilar asegura que las decisiones relacionadas con los activos, ya sean técnicas, financieras u operacionales, se traduzcan en planes y acciones orientadas al logro de los objetivos organizacionales. Implica la adopción de procesos de planificación basados en el riesgo, como la metodología RCM, así como la integración de la gestión de activos con otros procesos clave de la empresa, tales como finanzas, recursos humanos y operaciones.

Liderazgo. El compromiso de la alta dirección y el desarrollo de una cultura organizacional adecuada son elementos esenciales para establecer, operar y mejorar un sistema de gestión de activos. Este pilar requiere la definición clara de roles, responsabilidades y niveles de autoridad dentro de la organización, garantizando además la competencia, conciencia y participación activa del personal en la toma de decisiones relacionadas con los activos bajo su responsabilidad.

Aseguramiento. El aseguramiento proporciona la confianza de que los activos cumplirán de manera sistemática su propósito a lo largo de su ciclo de vida. Esto se logra mediante la implementación de procesos de seguimiento, control y mejora continua, asegurando que el desempeño de los activos se encuentre vinculado a los objetivos organizacionales. Asimismo, este pilar permite verificar que se dispone de los recursos adecuados y del personal competente para sostener el sistema de gestión de activos en el tiempo.

En el contexto de la presente memoria, la gestión de activos adquiere un rol de soporte crítico, dado que la planta de tratamiento de agua constituye el proveedor del insumo esencial para la operación de la embotelladora. En este sentido, el pilar de alineación se interpreta como la necesidad de sincronizar la capacidad de tratamiento de agua con la demanda variable de las líneas de embotellado, asegurando que este sistema no se convierta en un cuello de botella para la producción global.

Asimismo, el pilar de valor se manifiesta en la capacidad de la planta de agua para garantizar la continuidad del suministro, evitando detenciones productivas asociadas a la falta de disponibilidad del recurso.

Finalmente, los pilares de liderazgo y aseguramiento resultan esenciales para promover la coordinación entre las áreas involucradas en la gestión del sistema, permitiendo una toma de

decisiones coherente respecto a los activos bajo su responsabilidad y asegurando su desempeño a lo largo del tiempo.

Beneficios de la Gestión de Activos

Posterior a su comprensión y a los pilares que lo fundamentan, la gestión de activos físicos permite obtener beneficios que abarcan dimensiones financieras, operativas, legales, sociales y ambientales. Desde la perspectiva económica, se logra una optimización y mejora del retorno sobre la inversión (ROI), acompañada de una reducción de costos asociados al ciclo de vida de los activos, lo que favorece la toma de decisiones informadas al equilibrar costos, riesgos y oportunidades.

En el ámbito operativo, la gestión de activos contribuye a minimizar pérdidas financieras derivadas de fallas no planificadas, mejora las condiciones de salud y seguridad ocupacional y reduce la exposición a obligaciones legales, tales como multas o sanciones regulatorias. Asimismo, promueve un aumento en la eficiencia y eficacia global del sistema productivo, impactando directamente en indicadores de desempeño como el Overall Equipment Effectiveness (OEE).

Finalmente, este enfoque permite a la organización demostrar responsabilidad social y ambiental, mediante la reducción de emisiones, la conservación de recursos y el cumplimiento transparente de los requisitos legales y regulatorios vigentes, fortaleciendo además la satisfacción del cliente (International Organization for Standardization, 2014a).

Impacto de la Gestión de Activos en Overall Equipment Effectiveness (OEE)

Uno de los impactos más relevantes de la gestión efectiva de los activos físicos es su influencia directa sobre el desempeño operacional de los equipos, la cual puede cuantificarse mediante el indicador Overall Equipment Effectiveness (OEE). Este indicador integra tres componentes funda-

mentales: la Disponibilidad, el Rendimiento y la Calidad, permitiendo evaluar de manera conjunta la eficiencia real de operación de un sistema productivo.

El OEE se expresa como el producto de estos tres factores, tal como se muestra en la ecuación:

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidad} \times \text{Rendimiento} \times \text{Calidad}$$

Desde la perspectiva de la gestión de activos, una mejora sistemática en la confiabilidad, mantenibilidad y desempeño de los equipos impacta positivamente sobre cada uno de estos componentes, reflejándose en un aumento del OEE y, por tanto, en una mayor capacidad productiva efectiva del sistema.

Disponibilidad. La disponibilidad mide la proporción de tiempo en que el activo se encuentra disponible para producir respecto al tiempo total disponible. Para su determinación se necesita conocer el tiempo total planificado y el tiempo efectivo de producción (Sistemas OEE, 2025). La gestión de activos contribuye directamente a este pilar al enfocarse en la prevención de fallas imprevistas mediante la identificación sistemática de los modos de falla críticos. A través del uso de metodologías como el RCM, es posible identificar y mitigar los modos de falla que causan paradas no planificadas, aumentando considerablemente el tiempo medio entre fallas (MTBF), y reduciendo el tiempo medio de reparación (MTTR), lo que se traduce en un incremento directo de la disponibilidad operacional.

Rendimiento. El rendimiento representa la producción real obtenida y la capacidad productiva teórica posible del sistema esperada durante un periodo determinado. Para su evaluación,

se deben considerar las unidades producidas, siendo afectado principalmente por micro paradas, reducción de velocidad y fallas parciales del proceso (Sistemas OEE, 2025). Desde la perspectiva de la gestión de activos, este componente se ve favorecido al asegurar que los equipos operen cercanos a su capacidad de diseño, mediante la definición de tareas orientadas a eliminar las causas de micro paradas, pérdidas de velocidad y desviaciones operacionales. En consecuencia, se promueve una operación estable y sostenida en el tiempo bajo condiciones óptimas.

Calidad. La calidad mide el ratio de la producción que cumple correctamente con los estándares respecto de la capacidad productiva total en un periodo (Sistemas OEE, 2025). Para este pilar, es importante definir previamente los estándares de calidad para su posterior medición. La gestión de activos protege este pilar al priorizar los modos de falla que posean consecuencias directas en la calidad del producto final. Así mismo, incorpora sistemas de monitoreo y tareas de detección temprana que permiten asegurar que los equipos mantengan condiciones de operación compatibles con los requisitos del proceso productivo, garantizando una producción conforme.

Confiabilidad. Si bien este término no es parte de la fórmula matemática del OEE, la confiabilidad es un factor esencial y un precursor directo del desempeño operacional reflejado por el indicador. Influye de manera directa sobre la disponibilidad, el rendimiento y la calidad. Se define como la capacidad de un sistema, producto o servicio para desempeñar sus funciones con consistencia y predictibilidad durante un período de tiempo determinado y bajo diversas condiciones. En otras palabras, corresponde al grado en que puede esperarse que un sistema opere sin fallos o interrupciones significativas. Es crucial en una amplia gama de campos, desde la ingeniería y la tecnología hasta los negocios y las relaciones interpersonales (Tes Nehuén, 2024). En el contexto de la embotelladora, la confiabilidad se manifiesta en la capacidad de la planta de agua para ga-

rantizar el suministro continuo del recurso hídrico tanto para agua de proceso o para producción con los niveles requeridos de caudal y presión, evitando eventos que afecten la producción o la seguridad. De este modo, la confiabilidad se configura como un elemento estructural para el logro de un OEE elevado y sostenible en el tiempo.

El indicador OEE (Overall Equipment Effectiveness) fue introducido por Seiichi Nakajima en el contexto del Mantenimiento Productivo Total (TPM) y posteriormente adoptado por el sistema Lean Manufacturing, consolidándose como una herramienta fundamental para la medición del desempeño productivo (Sistemas OEE, 2025). Si bien el OEE fue concebido en un entorno industrial donde las fallas mecánicas constituían la principal fuente de pérdidas, en la industria moderna la mayor confiabilidad de los equipos ha desplazado el foco hacia fallas asociadas al proceso y a la complejidad del sistema productivo (Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad, 2025).

En este contexto, la vigencia del OEE no depende de modificar su formulación matemática, sino de redefinir los eventos considerados dentro de sus componentes, orientando el análisis desde la falla del equipo hacia la falla del proceso. Esto implica identificar microparadas, cuellos de botella, errores operacionales y pérdidas menores que afectan la eficiencia global del sistema productivo.

La gestión de activos físicos impacta directamente en los componentes del OEE, en particular en la disponibilidad y la confiabilidad de los equipos. Para evaluar este impacto se emplean indicadores como el MTTR (Mean Time to Repair) y el MTBF (Mean Time Between Failures), los cuales permiten cuantificar la rapidez de recuperación frente a fallas y el tiempo promedio entre eventos de falla consecutivos, respectivamente (Simpliroute, 2025). Estas métricas son fundamentales en la ingeniería de confiabilidad, ya que permiten diagnosticar el desempeño de los activos, apoyar la planificación estratégica del mantenimiento y fortalecer la toma de decisiones orientadas

a mejorar la productividad (Sistemas OEE, 2025).

Para el caso de estudio, se seleccionará una metodología técnica de mantenimiento con un enfoque orientado a generar mejoras no sólo a nivel de equipo individual, sino también sobre el sistema y el proceso productivo en su conjunto.

Estándares de Gestión

Los estándares de gestión proporcionan el marco de referencia normativo y los sistemas formales necesarios para integrar de manera coherente las metodologías de mantenimiento y confiabilidad dentro de la estructura organizacional. Estos estándares permiten alinear los procesos técnicos con los objetivos estratégicos de la empresa, asegurando consistencia en la toma de decisiones y en la gestión del riesgo a nivel corporativo.

ISO 55000:2014. Corresponde a una familia de normas que establece los principios, requisitos y terminología para la implementación de un sistema de gestión de activos. Su propósito es asegurar que los activos físicos generen valor a lo largo de su ciclo de vida, equilibrando desempeño, costo y riesgo mediante un enfoque sistemático y alineado con los objetivos organizacionales (International Organization for Standardization, 2014a).

SAE JA1011. Este estándar técnico define los criterios mínimos que debe cumplir un proceso para ser considerado Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM). Proporciona un marco objetivo para evaluar la correcta aplicación de la metodología RCM, garantizando que las decisiones de mantenimiento se fundamenten en el análisis funcional y en los modos de falla relevantes (SAE International, 2002).

Metodologías y Sistemas de Gestión para la gestión de activos

La gestión estratégica de los activos físicos comprende un conjunto de metodologías, herramientas y sistemas orientados a asegurar la generación de valor durante todo el ciclo de vida de los activos. Estas metodologías pueden clasificarse de acuerdo con su enfoque principal, ya sea hacia el proceso productivo, el mantenimiento o la mejora continua.

En este contexto, se reconocen diversas metodologías y estándares que sustentan la gestión de activos, entre las cuales destacan aquellas orientadas a la confiabilidad, al desempeño operacional y a la toma de decisiones basada en riesgo, las cuales se detallan a continuación:

Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM - Reliability Centered Maintenance). Es un proceso sistemático utilizado para determinar qué se debe hacer con el fin de asegurar que un activo físico continúe desempeñando las funciones que sus usuarios requieren en su contexto operacional actual. Su estructura metodológica se centra en las consecuencias de las fallas, reconociendo que la aplicación de mantenimiento proactivo responde al objetivo de evitar o reducir la ocurrencia de fallas. La correcta aplicación de RCM permite lograr mejoras rápidas, sostenidas y significativas en el desempeño organizacional, reflejadas en un aumento de la disponibilidad, la confiabilidad, la seguridad operacional y la integridad ambiental, así como en un mejor funcionamiento global de los sistemas productivos Moubray (1997).

Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF/FMEA). Es una metodología utilizada para identificar, evaluar y priorizar los modos de falla mediante la cuantificación del riesgo asociado a cada uno de ellos, a través del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Su objetivo principal es apoyar la formulación de estrategias de mantenimiento, siendo una herramienta ampliamente

utilizada dentro de procesos RCM. El AMEF permite identificar los modos de falla y analizar sus efectos sobre el sistema, entregando información clave para el diseño de programas de mantenimiento orientados a mejorar el rendimiento y la disponibilidad de los equipos (Moubray, 1997).

Adicionalmente, al incorporar una evaluación explícita de la criticidad, el método se amplía hacia el enfoque FMECA, el cual profundiza el análisis de las consecuencias de las fallas, permitiendo clasificar y priorizar los modos de falla según su impacto operacional, ambiental y en la seguridad.

Mantenimiento Productivo Total (TPM). Corresponde a una metodología con un enfoque orientado a la eliminación sistemática de fallas, integrándose como parte del proceso de mejora continua de la organización. En este enfoque, se promueve la participación activa de los operadores en tareas básicas de control y seguimiento de los equipos, buscando reducir la dependencia del mantenimiento correctivo y evitar la ocurrencia de fallas inesperadas. El TPM persigue que los equipos se encuentren siempre en condiciones adecuadas de operación, minimizando brechas entre el estado real del activo y su condición requerida para el proceso productivo (Lean Manufacturing¹⁰, n.d.).

De las metodologías mencionadas, el Mantenimiento Productivo Total (TPM) se descarta como enfoque principal para el desarrollo de este estudio, dado que su objetivo es eliminar de forma integral los fallos mediante la participación transversal de la organización. En el presente caso, el enfoque metodológico se orienta a una selección priorizada de los modos de falla a intervenir, considerando las dimensiones del sistema y la gran cantidad de equipos que conforman la planta de agua.

En este contexto, resulta necesario aplicar primero un proceso de jerarquización de los

activos mediante criterios de criticidad, para posteriormente analizar en profundidad los modos de falla de los equipos más relevantes. Por esta razón, se seleccionan las metodologías AMEF junto a criticidad (FMECA) y RCM como herramientas principales para el análisis de confiabilidad y el diseño de los planes de mantenimiento en la Planta de Agua.

Metodologías de Mejora de Procesos y Eficiencia

Estas metodologías buscan eliminar desperdicios y optimizar el flujo de valor alrededor de los activos y procesos productivos. Entre las principales se encuentran:

Lean Manufacturing. Lean Manufacturing, o producción esbelta, se orienta a la mejora del sistema de fabricación mediante la eliminación o reducción sistemática de los desperdicios (muda), definidos como aquellas actividades que consumen recursos sin aportar valor al producto o servicio y que el cliente no está dispuesto a pagar (Womack y Jones, 1996). Esta metodología persigue la reducción permanente de pérdidas, la optimización de los procesos y la disminución de costos, enfocándose en la eficiencia de los flujos productivos y de la cadena de suministro (Vinodh y Joy, 2011).

Six Sigma. Six Sigma se centra en la optimización de procesos mediante la reducción sistemática de errores y variabilidad. Su enfoque se basa en el uso intensivo de datos y herramientas estadísticas, utilizando como métrica principal los Defectos por Millón de Oportunidades (DPMO). Su propósito es identificar y eliminar las causas de los defectos, logrando procesos estables y productos que cumplan consistentemente los requisitos del cliente (Enciclopedia Humanidades, n.d.).

Si bien Lean Manufacturing y Six Sigma son metodologías distintas, ambas comparten

el objetivo de mejorar el desempeño organizacional mediante la optimización de procesos. Lean se enfoca en la eliminación de desperdicios y en la mejora del flujo de valor, mientras que Six Sigma prioriza la reducción de la variabilidad y de los defectos. En conjunto, permiten aumentar la eficiencia y la eficacia de los procesos productivos (Womack y Jones, 1996; Enciclopedia Humanidades, n.d.).

No obstante, estas metodologías no proporcionan un método estructurado para definir técnicamente cómo evitar que un activo falle. Por ello, deben complementarse con herramientas de confiabilidad como el AMEF o FMECA, que permiten analizar los modos de falla y diseñar estrategias de mantenimiento adecuadas.

Integración de metodologías en la gestión de activos

Tal como se expuso anteriormente, el presente estudio se fundamenta en estándares internacionales de gestión, sobre los cuales se selecciona una metodología con enfoque específico en la confiabilidad y el mantenimiento de los activos físicos.

Para abordar la gestión de activos de manera integral, resulta necesario distinguir entre los distintos niveles conceptuales involucrados: los estándares definen el *qué se debe hacer*, las metodologías establecen el *cómo hacerlo* y las herramientas de mejora permiten optimizar el *cómo hacerlo de manera más eficiente*.

En este contexto, los estándares internacionales de gestión proporcionan el marco de referencia, los principios y los requisitos necesarios para alinear la gestión de los activos físicos con los objetivos estratégicos del negocio. Por su parte, las metodologías técnicas permiten operacionalizar dichos estándares, estableciendo procedimientos sistemáticos para la toma de decisiones sobre mantenimiento y confiabilidad, como es el caso del RCM y el AMEF/FMECA.

Finalmente, una vez establecida una base sólida de gestión de activos físicos por ejemplo, mediante la aplicación de RCM, es posible incorporar metodologías de mejora de procesos que optimicen el desempeño del sistema productivo en el que operan los activos. En este nivel se sitúan herramientas como Lean Manufacturing o Six Sigma, orientadas a mejorar el flujo, reducir la variabilidad y elevar la calidad del proceso, sin sustituir el análisis técnico de confiabilidad requerido para prevenir fallas de los equipos.

De este modo, la integración entre estándares, metodologías de mantenimiento y herramientas de mejora permite construir un enfoque coherente de gestión de activos, donde la confiabilidad técnica de los equipos constituye la base para la eficiencia operativa y la mejora continua del sistema productivo.

5.3 RCM

Importancia del RCM en la Gestión del Mantenimiento

El mantenimiento tiene un impacto fundamental y multifacético sobre la disponibilidad de los activos y los costos operativos de una organización. En este contexto, la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) se posiciona como una herramienta estratégica para alcanzar dichos objetivos, al permitir seleccionar las políticas de mantenimiento más efectivas para cada activo en función de sus funciones y modos de falla.

La aplicación del RCM posibilita mejorar el desempeño de los activos mediante la reducción tanto en el número como en la severidad de las fallas no anticipadas, lo que se traduce en una disminución de las paradas imprevistas y, por ende, en una mayor continuidad operacional. Asimismo, al relacionar cada modo de falla con su respectiva falla funcional, el RCM proporciona una

estructura sistemática para el diagnóstico rápido de fallas, lo que contribuye a reducir los tiempos de reparación y a mejorar los indicadores de disponibilidad (Moubray, 1997).

A diferencia de activos productivos tradicionales, cuyo fallo puede afectar únicamente una línea de producción, los activos físicos de una planta de tratamiento de agua cumplen un rol transversal dentro del sistema productivo, ya que su función principal es suministrar el insumo base para todos los productos finales de la embotelladora. En este sentido, la indisponibilidad de estos activos impacta simultáneamente a múltiples procesos, amplificando las consecuencias operacionales y económicas de las fallas.

Por lo tanto, el enfoque metodológico debe centrarse en herramientas que permitan comprender y gestionar las fallas desde su origen, considerando tanto sus causas como sus consecuencias sobre el sistema completo. Bajo esta perspectiva, el uso del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad resulta particularmente adecuado para el análisis de los activos de la planta potabilizadora de agua, al priorizar la confiabilidad como eje principal para la toma de decisiones de mantenimiento.

Definición RCM

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM, por sus siglas en inglés) es definido como un proceso sistemático utilizado para determinar qué debe hacerse para asegurar que un activo físico continúe cumpliendo las funciones que sus usuarios esperan de él en su contexto operacional actual (Moubray, 1997). A diferencia de enfoques tradicionales basados en intervalos fijos de mantenimiento, el RCM centra su análisis en las funciones del activo y en las consecuencias asociadas a sus fallas, priorizando aquellas que afectan la seguridad, el medio ambiente y la operación.

El principio fundamental del RCM es que el objetivo del mantenimiento no es evitar fallas en sí mismas, sino preservar las funciones del sistema dentro de los niveles de desempeño requeridos. Desde esta perspectiva, una falla es entendida como la incapacidad de un activo para cumplir una función específica dentro de parámetros aceptables. Esto implica que la estrategia de mantenimiento debe construirse a partir del análisis funcional del sistema, considerando sus modos de falla, sus efectos y las consecuencias que estos generan en el contexto operativo.

Moubray señala además que muchas políticas tradicionales de mantenimiento preventivo se basan en la suposición de que la probabilidad de falla aumenta con la edad del componente. Sin embargo, estudios empíricos muestran que una gran proporción de los activos presenta patrones de falla aleatorios o independientes del tiempo, lo que vuelve ineficaz la sustitución periódica como estrategia universal. En este sentido, el RCM permite seleccionar de forma racional entre tareas preventivas, predictivas, acciones correctivas o rediseños, en función de la criticidad y consecuencias de cada falla.

Procedimiento

Según Moubray (1997), esta metodología es ampliamente reconocida por los profesionales como la forma más costo-eficaz de desarrollar estrategias de mantenimiento de clase mundial. El proceso RCM se estructura en torno a siete preguntas fundamentales aplicadas a cada activo o sistema analizado:

1. ¿Cuáles son las funciones y los estándares de desempeño asociados al activo en su contexto operacional actual?

2. ¿De qué manera puede fallar en cumplir dichas funciones?

3. ¿Cuál es la causa de cada falla funcional?

4. ¿Qué sucede cuando ocurre cada falla?

5. ¿En qué sentido es importante cada falla?

6. ¿Qué puede hacerse para prevenir o predecir cada falla?

7. ¿Qué debe hacerse si no se encuentra una tarea proactiva adecuada?

Antes de iniciar el análisis de los requerimientos de mantenimiento de los activos físicos de una organización, es necesario identificar y registrar los activos existentes, definiendo cuáles de ellos serán sometidos al proceso de revisión mediante RCM. Para ello, debe disponerse de un registro de planta actualizado. Asimismo, resulta indispensable comprender el contexto operacional de cada activo, es decir, determinar qué se espera de su funcionamiento por parte de los usuarios y bajo qué condiciones debe operar (Moubray, 1997).

Para lograr una correcta aplicación del RCM, el proceso debe centrarse en los siguientes aspectos fundamentales:

- Determinar cuáles activos físicos se beneficiarán en mayor medida del análisis RCM y de qué forma lo harán.
- Evaluar los recursos necesarios para aplicar el proceso a los activos seleccionados.
- En los casos en que los beneficios justifiquen la inversión, definir quiénes realizarán y auditarán cada análisis, cuándo y dónde se ejecutarán, y asegurar que el personal involucrado reciba la capacitación correspondiente.
- Garantizar que el contexto operacional de cada activo físico se encuentre claramente definido

y comprendido.

Para abarcar adecuadamente las siete preguntas del RCM, la revisión de los requerimientos de mantenimiento de un activo debe ser realizada por equipos de trabajo multidisciplinarios, que incluyan al menos a un representante del área de mantenimiento y a uno del área de operaciones (Moubray, 1997).

Con el fin de asegurar la efectividad del análisis, el proceso debe ejecutarse de manera estructurada desde su inicio, definiendo claramente los límites del sistema y el nivel de detalle apropiado. Además, todos los resultados y decisiones obtenidas deben ser registrados formalmente para garantizar su trazabilidad y facilitar su posterior revisión.

El factor humano cumple un rol determinante en el éxito del análisis. Es necesario que los integrantes del equipo comprendan adecuadamente la metodología y logren consensos de forma ordenada, evitando desviaciones del objetivo del análisis. Para que el proceso avance a un ritmo adecuado y dentro de los plazos establecidos, los participantes deben trabajar coordinadamente con la dirección del proyecto, asegurando la correcta planificación de las sesiones y el respaldo organizacional necesario (Moubray, 1997).

En relación con las fallas, estas dependen en gran medida de sus características, causas y consecuencias. El proceso RCM se enfoca directamente en el análisis de los estados de falla y de los eventos que los originan, los cuales se identifican respectivamente como fallas funcionales y modos de falla.

Elementos del Análisis RCM

Funciones. La definición de una función consiste de un verbo, un objeto y un estándar de funcionamiento deseado por el usuario. No obstante, en el contexto de la metodología RCM,

se reconoce que un activo no cumple una única función, sino que posee múltiples funciones que deben ser preservadas para asegurar su desempeño adecuado dentro del sistema (Moubray, 1997).

En este sentido, las funciones del activo se clasifican en dos categorías principales:

- **Funciones Primarias.** Corresponden a aquellas que justifican la adquisición del activo, ya que representan el propósito principal por el cual fue incorporado al sistema productivo. Estas funciones deben ser definidas considerando el desempeño requerido por el usuario en términos de capacidad, calidad y continuidad de operación (Moubray, 1997).
- **Funciones Secundarias.** Corresponden a aquellas funciones adicionales que el activo debe cumplir más allá de su función principal, generalmente asociadas a requisitos de seguridad, control, contención, protección ambiental y cumplimiento normativo. Estas funciones reflejan expectativas implícitas del usuario respecto al comportamiento del activo en su contexto operacional (Moubray, 1997).

Fallas Funcionales. Las fallas funcionales describen la incapacidad de un activo para cumplir una función requerida dentro de los límites de desempeño establecidos por el usuario. En este sentido, una falla funcional no se refiere a una rotura física específica, sino al estado en el cual el activo deja de satisfacer total o parcialmente una de sus funciones primarias o secundarias en su contexto operacional.

La identificación de las fallas funcionales permite establecer de manera estructurada qué es lo que el activo deja de hacer cuando falla, constituyendo el punto de partida para el análisis posterior de los modos y consecuencias de falla (Moubray, 1997).

Modos de Falla. Los modos de falla corresponden a los eventos o causas específicas que originan cada falla funcional. Representan las formas concretas en que un activo puede fallar en cumplir una función determinada, y pueden ser identificados a partir de la experiencia histórica, el análisis técnico y la observación de equipos similares que operen bajo un contexto operacional comparable.

Los modos de falla pueden estar asociados al desgaste natural por el uso, a defectos de fabricación, a errores humanos durante la operación o el mantenimiento, así como a deficiencias de diseño. Si bien algunos modos de falla pueden ser conocidos al momento de realizar el análisis, otros pueden surgir durante la operación del activo, lo que refuerza la necesidad de una revisión sistemática y estructurada (Moubray, 1997).

Efectos de Falla. Los efectos de falla corresponden a la descripción observable de lo que ocurre cuando se presenta un modo de falla determinado. Deben detallar de forma clara y objetiva qué sucede en el sistema y cómo se manifiesta la falla, incluyendo los síntomas físicos, el impacto inmediato sobre la operación y las acciones necesarias para restablecer el funcionamiento del activo.

Esta descripción debe proporcionar información suficiente para evaluar las consecuencias de la falla, considerando aspectos tales como la pérdida de producción, la dificultad de reparación, la existencia de evidencias visibles, y los posibles riesgos para la seguridad de las personas o para el medio ambiente (Moubray, 1997).

Consecuencias de la Falla. Las consecuencias de la falla describen el impacto que un modo de falla tiene sobre la operación, la calidad del producto, el servicio al cliente, la seguridad y el medio ambiente (Moubray, 1997). Su análisis permite priorizar las acciones de mantenimiento

en función del efecto real de la falla sobre el desempeño organizacional y no únicamente en función de la probabilidad de ocurrencia.

El proceso de RCM clasifica las consecuencias en cuatro grupos:

1. Consecuencias de Fallas Ocultas. Corresponden a fallas que no presentan un impacto inmediato y evidente, pero que exponen a la organización a la ocurrencia de fallas múltiples con consecuencias potencialmente graves o incluso catastróficas.

2. Consecuencias Operacionales. Se presentan cuando una falla afecta la producción en términos de cantidad, calidad, atención al cliente o costos operacionales, además del costo directo de reparación.

3. Consecuencias Ambientales y para la Seguridad. Ocurren cuando existe riesgo de daño o muerte de personas, o cuando se infringen normativas ambientales corporativas o legales.

4. Consecuencias no Operacionales. Corresponden a fallas que no afectan ni la seguridad ni la producción, y cuyo impacto se limita al costo directo de la reparación (Moubray, 1997).

La evaluación de las consecuencias permite focalizar los recursos de mantenimiento en aquellos modos de falla que generan mayor impacto sobre los objetivos del sistema, favoreciendo decisiones técnicas coherentes con el contexto operacional del activo (Moubray, 1997).

Políticas de Mantenimiento

En el enfoque del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, las políticas de mantenimiento se definen en función de las consecuencias de las fallas y del contexto operacional del activo, con el propósito de seleccionar la estrategia más adecuada para asegurar que este continúe cumpliendo

las funciones requeridas por el usuario (Moubray, 1997).

Tareas Proactivas. Su enfoque es prevenir fallas posibles del activo y abarcan los mantenimientos predictivos o preventivos. Estas tareas pueden definirse a partir de los registros históricos de fallas, con el fin de tomar acciones preventivas. A mayor complejidad del equipo, mayor será la complejidad de las acciones requeridas (Moubray, 1997). Se consideran 3 tipos de tareas proactivas:

1. Tareas de Reacondicionamiento Cíclicas. El reacondicionamiento cíclico implica re-fabricar un componente o reparar un conjunto antes de un límite de edad específico sin importar su condición en ese momento.

2. Tareas de Sustitución Cíclicas. Implican sustituir un componentes antes de un límite de edad específico, más allá de su condición en ese momento. En conjunto estos dos tipos de tareas son conocidos generalmente como mantenimiento preventivo.

3. Tareas a Condición. Se definen por el hecho de que la mayoría de las fallas proveen algún tipo de advertencia identificable antes de convertirse en una falla funcional. Estas advertencias se denominan fallas potenciales. El propósito de las tareas a condición es detectar estas fallas potenciales mediante técnicas de monitoreo y permitir la intervención programada justo antes de que ocurra (Moubray, 1997).

Acciones Ante la Ausencia de Tareas Proactivas. Estas acciones se aplican cuando no es posible definir una tarea proactiva efectiva y la falla ocurre sin haber sido detectada previamente. Estas acciones buscan cuál fue la falla, qué ocurrió y si se necesita re diseñar el mantenimiento. Se

reconocen tres grandes categorías:

1. *Búsqueda de Fallas.* Implican revisar periódicamente las funciones ocultas para determinar si han fallado (mientras que las tareas basadas en la condición implican revisar si algo está por fallar).

2. *Rediseño.* Implica hacer cambios de una sola vez a las capacidades iniciales de un sistema. Esto incluye modificaciones al equipo y también cubre los cambios de una sola vez a los procedimientos.

3. *Ningún Mantenimiento Programado.* En esta acción no se hace esfuerzo alguno en tratar de anticipar o prevenir los modos de falla y se deja que la falla simplemente ocurra, para luego repararla. Esta tarea a falta de también es llamada mantenimiento 'a rotura' y puede ser aplicada cuando el costo de recambio es muy por debajo de un costo de mantenimiento Moubray (1997).

Estas políticas constituyen la base para el diseño y rediseño de los planes de mantenimiento de los equipos críticos de la planta de agua analizados en esta investigación.

5.4 Relación entre RCM y AMEF/FMECA

El Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) establece un marco metodológico para definir qué debe hacerse con el fin de asegurar que los activos físicos continúen cumpliendo sus funciones en su contexto operacional (Moubray, 1997). Sin embargo, para que este enfoque pueda aplicarse de manera sistemática y objetiva, es necesario disponer de herramientas que permitan identificar, estructurar y priorizar los modos de falla y sus consecuencias.

En este contexto, el Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) se constituye como una

herramienta fundamental dentro del proceso RCM, ya que permite operacionalizar varias de las preguntas centrales del método, particularmente aquellas relacionadas con los modos de falla, sus efectos y su importancia relativa. A través del AMEF, es posible descomponer un sistema en sus funciones, identificar cómo puede fallar cada una de ellas y evaluar los efectos que dichas fallas producen sobre la operación, la seguridad, el medio ambiente y la calidad del producto (Moubray, 1997).

Desde la perspectiva de la gestión de activos físicos, la norma ISO 55000 establece que las decisiones técnicas deben alinearse con los objetivos organizacionales, considerando el equilibrio entre costo, riesgo y desempeño. En este sentido, la integración entre RCM y AMEF/FMECA permite traducir los principios estratégicos de la gestión de activos en decisiones técnicas concretas, basadas en el análisis sistemático del comportamiento de los equipos y en la evaluación estructurada de sus fallas potenciales (International Organization for Standardization, 2014a).

Asimismo, la norma SAE International (2002) define los criterios que debe cumplir un proceso para ser considerado como RCM, destacando la necesidad de identificar funciones, fallas funcionales, modos de falla y consecuencias, así como de seleccionar políticas de mantenimiento coherentes con dichos análisis. El uso del AMEF dentro del proceso RCM facilita el cumplimiento de estos criterios, al proporcionar un soporte metodológico para documentar y evaluar cada uno de estos elementos de manera ordenada y reproducible (SAE International, 2002).

En consecuencia, el AMEF/FMECA no constituye una metodología independiente del RCM, sino una herramienta analítica que permite llevar el enfoque conceptual del RCM a un nivel operativo. Mientras el RCM define el marco lógico para decidir qué hacer frente a las fallas, el AMEF/FMECA permite identificar y priorizar de manera estructurada los modos de falla que fundamentan dichas decisiones (Moubray, 1997).

En el contexto de esta investigación, se emplea el uso del análisis de criticidad de equipos y un AMEF detallado para los activos identificados como críticos, de modo de sustentar técnicamente la selección de políticas de mantenimiento bajo la lógica del RCM. De esta manera, se articula un enfoque integrado en el cual el RCM proporciona el marco conceptual y el AMEF/FMECA actúa como herramienta operativa para la toma de decisiones sobre mantenimiento (Moubray, 1997).

5.5 Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF/FMECA)

El Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF) es una técnica sistemática utilizada para identificar los modos de falla potenciales de un sistema, sus causas y los efectos que producen sobre las funciones del activo. Su aplicación permite estructurar de manera ordenada la información asociada a las fallas, facilitando la evaluación de sus consecuencias y apoyando la toma de decisiones en materia de mantenimiento (Moubray, 1997).

Dentro del enfoque del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, el AMEF constituye una herramienta clave para responder varias de las preguntas fundamentales del proceso RCM, particularmente aquellas relacionadas con la identificación de los modos de falla, los efectos de dichas fallas y la importancia de cada una de ellas. De esta manera, el AMEF permite traducir el análisis funcional del activo en una representación estructurada de sus posibles fallas y de su impacto sobre la operación, la seguridad y el medio ambiente (Moubray, 1997).

Cuando el AMEF incorpora un análisis explícito de criticidad, se transforma en un FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis), el cual agrega un criterio de priorización basado en la evaluación del riesgo asociado a cada modo de falla. Esta evaluación suele considerar factores como la severidad de las consecuencias, la probabilidad de ocurrencia y la posibilidad de detección previa a la falla funcional. El resultado es una jerarquización de los modos de falla que orienta

la selección de políticas de mantenimiento coherentes con el nivel de riesgo aceptable para la organización (Moubray, 1997).

Desde la perspectiva de la gestión de activos físicos, la norma ISO 55000 establece que las decisiones técnicas deben fundamentarse en el equilibrio entre desempeño, costo y riesgo. En este sentido, el uso del AMEF/FMECA permite materializar este principio, al proporcionar una base estructurada para evaluar el impacto de las fallas sobre los objetivos del negocio y priorizar las acciones de mantenimiento en función de su contribución al desempeño global del sistema (International Organization for Standardization, 2014a).

Asimismo, la norma SAE JA1011 define que un proceso RCM válido debe identificar funciones, fallas funcionales, modos de falla y consecuencias, así como seleccionar políticas de mantenimiento adecuadas a partir de dicho análisis. La utilización del AMEF dentro del proceso RCM facilita el cumplimiento de estos requisitos, al constituir un soporte metodológico para documentar y analizar de forma ordenada los elementos exigidos por la norma (SAE International, 2002).

5.6 Análisis de Criticidad de Equipos

El análisis de criticidad de equipos es una herramienta utilizada para priorizar los activos físicos en función de las consecuencias que puede generar su falla sobre la operación, la seguridad, el medio ambiente y los costos. Su objetivo es identificar aquellos equipos cuya indisponibilidad tendría un mayor impacto sobre los objetivos del sistema productivo, permitiendo focalizar los recursos de mantenimiento en los activos más relevantes (Moubray, 1997).

En el enfoque del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, no resulta técnica ni económicamente viable aplicar el proceso completo de RCM a todos los activos físicos de una instalación, debido al alto consumo de tiempo y recursos que implica el análisis detallado de funciones y mo-

dos de falla. Por esta razón, se requiere una selección previa de los equipos a analizar, priorizando aquellos cuyas fallas generen consecuencias significativas para la organización (Moubray, 1997).

Desde la perspectiva de la gestión de activos, la norma ISO 55000 establece que las decisiones deben basarse en el equilibrio entre desempeño, costo y riesgo. En este contexto, el análisis de criticidad permite jerarquizar los equipos según el nivel de riesgo asociado a su falla y orientar la asignación de recursos hacia los activos que aportan mayor valor al cumplimiento de los objetivos organizacionales (International Organization for Standardization, 2014a).

La criticidad se determina mediante la evaluación conjunta de la severidad de las consecuencias de falla y su probabilidad de ocurrencia, considerando criterios como impacto en la producción, seguridad, medio ambiente, calidad del producto y costos de reparación. Una forma habitual de representar este análisis es mediante una matriz de criticidad, que combina ambos factores para clasificar los equipos en categorías de alta, media o baja criticidad y definir cuáles serán sometidos a análisis posteriores como el AMEF o FMECA (Moubray, 1997).

5.7 Planta Potabilizadora de Agua

Definición

El tratamiento de agua consiste en la aplicación de procesos físicos, químicos y biológicos destinados a eliminar contaminantes y obtener un recurso adecuado para su uso, ya sea humano, animal o industrial. Cuando el destino final corresponde al consumo humano, se habla de tratamiento de agua potable. Este proceso varía según la calidad inicial del agua y su uso final, pero se ha vuelto cada vez más indispensable debido a la escasez de agua potable y al aumento sostenido de la demanda global. Aunque el 70 % de la superficie terrestre está cubierta por agua, solo el

0,025 % es apta para consumo humano. Según la OCDE, la demanda mundial podría incrementarse hasta un 55 % entre los años 2000 y 2050, lo que refuerza la necesidad de optimizar los procesos de tratamiento del recurso hídrico (Disin S.A., 2021).

Descripción Funcional del Proceso de Tratamiento

Para efectos del análisis mediante la metodología RCM, resulta fundamental descomponer la planta en subsistemas funcionales, dado que esta metodología requiere identificar funciones específicas y no únicamente equipos aislados. El proceso de tratamiento en la planta de Andina S.A. puede describirse a través de las siguientes etapas secuenciales:

Captación y Pre-tratamiento. Etapa encargada de la impulsión inicial del agua cruda y de la eliminación de sólidos suspendidos de mayor tamaño mediante procesos de filtración física. Su función principal es asegurar el caudal de entrada requerido por el diseño del sistema.

Tratamiento Físico-Químico. Incluye la dosificación de reactivos para regular parámetros tales como pH y turbidez, con el objetivo de acondicionar el agua y proteger los sistemas de separación de las etapas posteriores.

Filtración y Purificación (Osmosis/Membranas). Constituye el núcleo del sistema de tratamiento. Su función es remover sólidos disueltos y contaminantes a nivel molecular, de manera de cumplir con los estándares de calidad exigidos para el producto final, correspondiente a agua grado alimenticio.

Sistema de Distribución. Conjunto de bombas, válvulas y redes de tuberías encargadas de transportar el agua tratada hacia los estanques de almacenado y las líneas de embotellado,

donde para dichas líneas, se deben mantener condiciones estables de caudal y presión conforme a los requerimientos de operación de la llenadora.

Contexto Operacional y Estándares de Servicio

El contexto operacional define las condiciones bajo las cuales operan los activos físicos y constituye un factor determinante para la evaluación de las consecuencias de falla según el enfoque RCM. Para esta planta, se identifican las siguientes condiciones críticas:

Régimen de Operación. La planta opera bajo un régimen continuo (24/7), donde la demanda de agua tratada es variable acorde a la cantidad de producción objetivo del día. Lo anterior implica que el sistema de tratamiento de agua debe estar disponible tanto para almacenar agua tratada (reserva de agua) como también debe operar debidamente para suplir la demanda diaria.

Redundancia. Existen equipos críticos, tales como bombas de alimentación, que operan bajo respaldo (1 en operación y 1 en espera) para asegurar la disponibilidad. En contraste, otros subsistemas, como los módulos de membranas, operan en configuración en serie, lo que implica que una falla en estos puede detener el proceso completo

Estándares de Calidad. A diferencia del agua potable municipal, el agua producida en la planta constituye un insumo alimentario. Por ello, cualquier desviación en parámetros tales como sabor, olor o conductividad es gestionada mediante procesos de recuperación de agua (WUR), permitiendo su reprocesamiento y posterior reincorporación al sistema.

La planta de agua asociada a la empresa de envasado tiene como función principal suministrar el recurso esencial para la elaboración de sus productos finales. El proceso de potabiliza-

ción adquiere especial relevancia en un contexto de cambio climático y escasez hídrica, donde la continuidad operacional y la confiabilidad del sistema de tratamiento resultan críticas para la sostenibilidad productiva.

6 Metodología

Enfoques metodológicos

La metodología propuesta considera dos formas de intervención, en función del estado de los activos físicos:

Enfoque Proactivo

Este enfoque considera los activos físicos nuevos que ingresan a un sistema productivo. En primer lugar, estos son seleccionados y jerarquizados según su criticidad. Posteriormente, se realiza un análisis AMEF basándose en la información técnica entregada por el fabricante o proveedor mediante manuales y documentación asociada, con el objetivo de establecer lineamientos para diseñar planes de mantenimiento desde su puesta en operación.

Enfoque de Optimización

Este enfoque está dirigido a los equipos actualmente en operación. Los activos serán seleccionados según su criticidad y posteriormente auditados mediante análisis AMEF, con el objetivo de mejorar los planes de mantenimiento existentes, considerando la criticidad, el historial de funcionamiento y el análisis de causas de fallas previas.

Cabe destacar que esta metodología se centra en activos físicos que forman parte de procesos productivos, por lo que no resulta representativa para el análisis de servicios, donde una parte significativa de los elementos involucrados es de carácter intangible.

En función de lo anterior, la metodología se estructura en cinco fases principales, alineadas directamente con los objetivos específicos definidos.

6.1 Fase 1: Contexto Operacional y Definición de Sistemas

El primer paso consiste identificar y delimitar la intervención, situando los sistemas y equipos a analizar dentro del contexto operacional global y estableciendo su propósito funcional.

Levantamiento de Información

Para los equipos nuevos, se establece una coordinación de reuniones con las áreas de mayor impacto, importancia y responsabilidad asociadas a dichos activos. Se realizan visitas técnicas para inspeccionar la instalación, comprender las interdependencias físicas y lógicas con los sistemas existentes y revisar de manera exhaustiva la documentación técnica disponible, tales como planos y manuales del fabricante.

En el caso de los equipos existentes, el levantamiento incluye la recopilación de planos y documentación técnica, así como visitas a terreno. Además, se solicita apoyo de técnicos especializados en las máquinas en operación, quienes aportan conocimiento basado tanto en su experiencia como en el historial de fallas registrado en la planta, lo cual resulta fundamental para el desarrollo del análisis.

Definición de Funciones y Contexto Operacional

Se identifican y definen las funciones de los principales sistemas involucrados y de sus respectivos equipos. Para ello, se recopilan diagramas de flujo, P&ID y manuales técnicos que permitan comprender el proceso y apoyar el análisis posterior.

Delimitación de Alcance

Se establecen los límites del proyecto considerando restricciones técnicas y operativas. Esto implica definir qué equipos serán analizados, el nivel de profundidad del análisis por sistema, sub-sistema y equipo, los recursos disponibles, el personal especializado requerido y la identificación de los procesos clave.

Definir Grupo de Análisis

El grupo de análisis estará conformado por personal del área de mantenimiento, facilitadores técnicos, personal de otras áreas involucradas en la operación y especialistas en automatización. Este equipo integra conocimientos esenciales tanto del mantenimiento como de la relación entre los equipos y los procesos productivos en los que se encuentran insertos.

Con lo anterior, la fase 1 permite recopilar una base técnica y operativa necesaria para la posterior evaluación de criticidad de los equipos y la aplicación de las herramientas de análisis de fallas.

6.2 Fase 2: Evaluación de Criticidad y Priorización de Análisis

Criterios para Evaluación de Criticidad de Equipos

Para priorizar los equipos y sistemas que serán analizados en etapas posteriores, primero se establecen los criterios técnicos que permitirán evaluar su nivel de criticidad. Estos criterios representan distintas áreas de impacto que pueden verse afectadas ante la falla de un activo dentro del sistema productivo.

Criterio Legal y Normativo. Este criterio evalúa el cumplimiento de las regulaciones vigentes aplicables a la industria (sanitaria, eléctrica, laboral, entre otras) y los compromisos asociados a organismos fiscalizadores. El objetivo es cuantificar el riesgo de sanciones, multas o clausuras operativas derivadas de una falla en el activo o de su impacto en el cumplimiento del marco regulatorio.

En la evaluación de criticidad se considera una condición de cumplimiento o incumplimiento, sin situaciones intermedias, dado que un incumplimiento normativo puede implicar la detención total de las operaciones. Por esta razón, se considera uno de los pilares más relevantes dentro de la evaluación de criticidad.

Para su medición se formula la pregunta: ¿La falla vulnera normativas vigentes o expone a la organización a sanciones por parte de la autoridad?

- **Nivel 1 (Sin Impacto).** Falla o evento que no afecta el cumplimiento de normativas ni permisos. Operación normal dentro de los márgenes legales.
- **Nivel 5 Incumplimiento legal.** Falla que provoca la pérdida de la Resolución Sanitaria o multas de autoridades.

Adicionalmente, este criterio se considera de **carácter excluyente** dentro de la evaluación de criticidad. En caso de identificarse un nivel 5 asociado a incumplimiento legal o normativo, el equipo se clasifica automáticamente como crítico, independiente del resultado obtenido en los demás criterios. Esto se debe a que un incumplimiento regulatorio puede implicar la detención inmediata de las operaciones, sanciones económicas o incluso la clausura de instalaciones.

Por el contrario, si el activo no presenta incumplimientos normativos, este criterio no incrementa la criticidad del equipo dentro de la matriz, manteniéndose únicamente como una condición

de verificación del cumplimiento regulatorio y se continúa con la evaluación de los demás criterios asociados.

Seguridad. Este criterio se considera de la mayor jerarquía ética y operativa, ya que está directamente relacionado con la protección de la vida humana. Evalúa cómo una potencial falla puede generar daños a la integridad física de trabajadores, contratistas o terceros. Se alinea con la prevención de accidentes graves o fatales.

Debido a su impacto sobre la vida humana y la cultura organizacional, se le asigna una de las ponderaciones más altas dentro de la matriz. Además, involucrar a las personas en el proceso RCM permite generar una comprensión clara de la importancia de respetar los procedimientos de seguridad y de los riesgos asociados a su incumplimiento (Moubray, 1997).

Para realizar su medición se establece la pregunta: ¿Puede provocar un accidente laboral? La cual debe ser contestada mediante la valorización asignada de los niveles.

- **Nivel 1 (Seguro).** El equipo falla en condiciones seguras. No existe riesgo de lesión.
- **Nivel 2 (Riesgo menor o casi Accidente).** Condición que no genera daño, pero eleva el riesgo (ej. filtraciones menores, zonas resbaladizas).
- **Nivel 3 (Lesión Leve).** Incidente que requiere primeros auxilios en sitio, sin pérdida de jornada laboral.
- **Nivel 4 (Lesión Grave).** Accidente con tiempo perdido. Puede considerarse fracturas, quemaduras o lesiones que requieren reposo médico y declaración ante la mutualidad.
- **Nivel 5 (Fatalidad/Incapacidad).** Accidente catastrófico que resulta en fatalidad o incapacidad permanente de uno o más trabajadores (ej. Atrapamiento de partes móviles, caída en

altura).

Calidad. Evalúa el impacto de la falla en las especificaciones técnicas y características del producto final o servicio entregado. Una desviación en este criterio puede generar productos no conformes, reprocesos, mermas o rechazos por parte del consumidor, lo cual puede derivar en devoluciones, sanciones sanitarias o pérdidas económicas significativas.

En industrias con altos estándares de inocuidad o precisión, este factor resulta determinante para la competitividad.

Para su medición se establece la pregunta: ¿Afecta el sabor, color o es inofensivo del producto? Evaluándola según el nivel asociado para cada equipo en este criterio.

- **Nivel 1 (Conforme).** No existe afectación a la calidad. El producto cumple todos los parámetros establecidos.
- **Nivel 2 (Parámetro Menor).** Variación leve de parámetros ajustables internamente sin afectar la inocuidad o funcionalidad final (ej. pH ligeramente variable pero dentro de norma interna, no afecta inocuidad).
- **Nivel 3 (Producto No Conforme).** El producto sale de especificación y debe ser reprocesado o descartado internamente (merma). No llega a la etapa de almacenamiento final.
- **Nivel 4 (Bloqueo de Lote).** El producto defectuoso llega a bodega de producto terminado, requiriendo bloqueo e inspección exhaustiva para evitar su despacho y proceder al retiro.
- **Nivel 5 (Retiro del Mercado).** El producto inseguro o defectuoso llega al cliente o consumidor final. Riesgo para la salud pública.

Productividad. Mide la repercusión de la falla en la disponibilidad de los activos y en la continuidad operacional. Se evalúa desde situaciones sin impacto hasta la detención completa de una línea de proceso o de la planta, afectando directamente indicadores clave como el OEE (Overall Equipment Effectiveness) y el cumplimiento de los planes de producción.

El control de este criterio permite asegurar el cumplimiento de las metas productivas y evitar incumplimientos con clientes.

Para su evaluación se plantea la siguiente pregunta: ¿Detiene o reduce la capacidad de producción?

- **Nivel 1 (*Sin Impacto*).** La falla permite continuar la operación y puede ser reparado sin inconvenientes.
- **Nivel 2 (*Micro Detención, <1 hora*).** Detención menor o cambio rápido de componentes que no afecta significativamente el flujo continuo.
- **Nivel 3 (*Parada Media*).** Detención considerable (ej. 1 - 3 horas) que afecta el cumplimiento del turno, pero recuperable mediante gestión de horas extra.
- **Nivel 4 (*Parada Mayor*).** Impacto significativo en el plan de producción diario (ej. >3 horas). Se generan quiebres de stock o retrasos en entregas programadas.
- **Nivel 5 (*Detención Total*).** Falla catastrófica que impide la producción por periodos prolongados (más de un turno o días completos).

Costos. Este criterio refiere al impacto económico asociado a la restauración de las funciones de los activos tras una falla, considerando costos de reparación, repuestos, horas-hombre, pérdidas por desechos, servicios externos o incumplimientos de entrega.

Desde la perspectiva del mantenimiento, existe una presión constante por reducir fallas y costos asociados. Sin embargo, es necesario encontrar un equilibrio entre el costo de las fallas operacionales, el costo de mantener inventarios o trabajo en proceso para mitigar sus efectos, y el costo de implementar mantenimiento proactivo para prevenirlas (Moubrey, 1997).

Para su evaluación se hace la pregunta: ¿Su falla implica costos altos en reparación o pérdida?

- **Nivel 1 (Bajo).** Costos menores a \$500.000.
- **Nivel 2 (Medio-Bajo).** Costos entre \$500.000 y menores a \$2.000.000 que requieren gestión de compra estándar, dentro de márgenes habituales.
- **Nivel 3 (Medio).** Reparación que implica un gasto considerable entre \$2.000.000 y menores a \$3.000.000, requiriendo aprobación de jefatura directa.
- **Nivel 4 (Alto).** Costos elevados que impactan el presupuesto mensual del área entre \$3.000.000 y \$5.000.000, requiriendo posiblemente reasignación de recursos.
- **Nivel 5 (Crítico).** Costo de reparación excede el valor de reposición o requiere uso de presupuesto de inversión (CAPEX) o fondos de emergencia mayores a \$5.000.000.

Medioambiente. Evalúa el riesgo de que una falla produzca derrames, emisiones o contaminación ambiental. En el contexto actual, la gestión ambiental resulta fundamental debido a sus implicancias legales, sociales y reputacionales.

Las sanciones regulatorias asociadas a incidentes ambientales pueden incluso superar las pérdidas derivadas de interrupciones productivas, por lo que este criterio adquiere alta relevancia dentro de la evaluación de criticidad.

La pregunta guía para la respuesta cuantificable es: ¿Podría generar derrames o emisiones contaminantes?

- **Nivel 1 (*Sin Impacto*).** Proceso hermético, sin fugas ni emisiones al entorno.
- **Nivel 2 (*Impacto Local Menor*).** Goteos o fugas mínimas contenidas en el punto de origen, limpieza inmediata.
- **Nivel 3 (*Impacto Contenido*).** Derrame o emisión de volumen considerable, pero retenido exitosamente por sistemas de contención secundaria (pretilos/cubetos).
- **Nivel 4 (*Impacto Mayor*).** El derrame supera la capacidad de contención de la planta, afectando zonas internas no protegidas.
- **Nivel 5 (*Contaminación grave*).** Contaminación externa a la planta. El fluido o emisión alcanza suelo natural, alcantarillado público, cauces de agua o napas subterráneas.

Impacto a la Marca. Considera la visibilidad del problema hacia el entorno externo, desde reclamos internos hasta daños reputacionales difundidos en redes sociales o medios de comunicación. La marca constituye un activo intangible fundamental para la organización, por lo que una falla que afecte la percepción del consumidor puede generar pérdida de confianza y participación de mercado.

Se utiliza como pregunta guía: ¿Podría generar un problema que afecte la reputación de la empresa?

- **Nivel 1 (*Impacto insignificante*).** La falla no genera visibilidad externa ni afecta la percepción de la marca. El evento se gestiona internamente sin impacto en el consumidor.

- **Nivel 2 (Impacto menor).** La falla puede generar inconvenientes internos o ajustes operacionales, pero no es perceptible para el consumidor ni afecta la reputación de la empresa.
- **Nivel 3 (Impacto moderado).** La falla podría afectar temporalmente la disponibilidad de productos o generar reclamos aislados de clientes, sin generar repercusión pública relevante.
- **Nivel 4 (Impacto alto).** La falla podría provocar reclamos significativos de clientes, incumplimientos de compromisos comerciales o afectar la percepción de calidad del producto.
- **Nivel 5 (Impacto crítico).** La falla podría generar un evento de alta visibilidad pública, como retiro de productos del mercado, denuncias sanitarias o cobertura mediática, afectando directamente la reputación de la empresa.

Cada uno de los criterios definidos permite cuantificar el impacto potencial asociado a la falla de los equipos. La ponderación y escala de evaluación utilizadas para cada criterio se presentan en la Tabla 1, la cual permite calcular el nivel de criticidad de los activos analizados.

Tabla 1
Matriz de Evaluación de Criticidad de Equipos

Criterios	1 (Muy Bajo)	2	3	4	5 (Muy Alto)	Peso Asociado
Legal y normativo	Sin incumplimientos legales				Incumplimiento legal	Excluyente
Seguridad	Sin riesgo	Riesgo menor	Lesión leve	Lesión grave	Accidente fatal	25 %
Calidad	No afecta calidad	Parámetro menor	Producto no conforme	Posible retiro	Contaminación/Retiro masivo	30 %
Productividad	Sin impacto	<1 hr detenido	1-3 hrs detenido	>3 hrs detenido	Detención total de línea o planta	20 %
Costos	<\$500.000	\$500.000 <\$2.000.000	\$2.000.000 <\$3.000.000	\$3.000.000 <\$5.000.000	\$5.000.000 o más	10 %
Medioambiente	Sin impacto	Impacto menor	Impacto contenido	Impacto mayor	Contaminación ambiental grave	10 %
Impacto a la marca	Sin visibilidad	Reclamo interno	Queja de cliente	Daño en RRSS	Daño reputacional	5 %

Nota. Esta tabla muestra la cuantificación y ponderación de cada criterio considerado para la evaluación de criticidad. Elaboración Propia.

Clasificación de Equipos

Una vez evaluados los criterios definidos, cada equipo obtiene una ponderación final que permite clasificarlo según su nivel de criticidad. Para ello se utiliza una clasificación tipo ABC

(alta, media y baja criticidad).

Se considerará un equipo **crítico (A)** cuando obtenga un puntaje superior a 3,8. Estos activos requieren planes de mantenimiento más rigurosos, monitoreo constante y respaldo en las acciones de intervención.

Se clasificará como **criticidad media (B)** cuando el puntaje se encuentre entre 3 y 3,7. Estos equipos mantienen continuidad operativa mediante planes de mantenimiento regulares, aunque presentan oportunidades de mejora.

Finalmente, se considerará **criticidad baja (C)** cuando el puntaje sea inferior a 3. En estos casos, el impacto de la falla es limitado y pueden mantenerse bajo esquemas de mantenimiento estándar.

De esta manera, la evaluación de criticidad permite focalizar el análisis en aquellos equipos con mayor impacto operacional, optimizando el uso de recursos y permitiendo aplicar herramientas más detalladas de análisis de fallas como el AMEF.

6.3 Fase 3: Análisis de Modos y Efectos de Falla

El análisis de criticidad desarrollado en la Fase 2 permite identificar y priorizar los equipos que presentan mayor impacto potencial sobre la operación del sistema. En consecuencia, el análisis de modos y efectos de falla (AMEF) se aplica únicamente a los activos clasificados como críticos (A), considerando tanto equipos actualmente en operación como aquellos incorporados recientemente al sistema.

De esta manera, mientras la evaluación de criticidad permite priorizar los equipos que deben ser analizados, el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) permite jerarquizar los modos de falla específicos dentro de cada equipo analizado.

Caracterización del equipo

Para desarrollar el análisis AMEF, cada equipo seleccionado será analizado de manera individual siguiendo una secuencia estructurada de etapas que permiten identificar sus funciones, fallas potenciales y consecuencias asociadas.

En primer lugar, se identifica y describe el equipo, definiendo su propósito dentro del sistema de tratamiento de agua y su rol dentro del proceso operativo de la planta. Esta caracterización inicial permite contextualizar el análisis y comprender la importancia funcional del equipo o sistema dentro de la planta.

Funciones Primarias y Secundarias

Posteriormente, se identifican las funciones que el equipo debe cumplir dentro del sistema, distinguiendo entre funciones primarias y funciones secundarias. Esta caracterización funcional constituye la base para la posterior identificación de fallas funcionales y modos de falla dentro del análisis AMEF.

Despiece del Equipo/Sistema

Una vez definidas las funciones del equipo, se procede a realizar un desglose jerárquico del sistema en sus principales subsistemas, equipos y componentes. Este proceso permite estructurar el análisis e identificar los elementos relevantes sobre los cuales se evaluarán los posibles modos de falla.

El nivel de desagregación del sistema se define de manera que permita identificar adecuadamente los elementos funcionales del equipo sin generar un nivel de detalle excesivo que complique

el desarrollo del análisis. Este proceso permite estructurar el análisis y facilitar la identificación de los elementos del equipo sobre los cuales se evaluarán los posibles modos de falla.

Para realizar el desglose jerárquico de los equipos analizados, se utiliza el formato presentado en la Tabla 2.

Tabla 2

Formato para el Desglose Jerárquico de Equipos

CÓDIGO I	NIVEL I	CÓDIGO II	NIVEL II	CÓDIGO III	NIVEL III	CÓDIGO IV	NIVEL IV
1	[Sistema]	1.1	[Subsistema]	1.1.1	[Equipo]	1.1.1.1	[Componente]
		1.2	[Subsistema]	1.1.2	[Equipo]	1.1.1.2	[Componente]
						1.1.1.3	[Componente]
2	[Sistema]	...	...	...	...	...	...

Nota. Este formato permite una identificación estructurada de todos los equipos y sus componentes que serán sujetos al análisis AMEF. Elaboración propia.

Fallas Funcionales

A partir de las funciones identificadas, se procede a definir las fallas funcionales asociadas, las cuales representan las situaciones en que el equipo no es capaz de cumplir total o parcialmente su función dentro del sistema. Esta etapa corresponde a los primeros pasos del enfoque RCM (Pasos 1 y 2). A partir de las funciones identificadas, se procede a definir las fallas funcionales asociadas, las cuales representan las situaciones en que el equipo no es capaz de cumplir total o parcialmente su función dentro del sistema. Esta etapa corresponde a los dos primeros pasos del enfoque RCM, los cuales constituyen la base para la posterior identificación de los modos de falla evaluados en el análisis AMEF.

Identificación Modo de Falla

Una vez identificada cada falla funcional, se identifican los eventos o condiciones que razonablemente pueden provocar dicho estado de falla (Moubray, 1997). Para ello, se analiza el desglose del equipo con el objetivo de asociar los posibles modos de falla a los componentes involucrados. De esta manera, se enlistan los modos de falla correspondientes a cada parte del equipo, pudiendo existir más de un modo de falla para un mismo componente. (Paso 3 del RCM)

Identificación Efecto y Causa de Falla

Al igual que los modos de falla, los efectos deben enlistarse acorde a cada modo de falla identificado. Su descripción debe incluir información que permita comprender: si existe evidencia de que la falla ha ocurrido, de qué modo amenaza la seguridad, medioambiente, afecta a la producción, operaciones o posibles daños físicos (Moubray, 1997). (Paso 4 RCM)

Además, se debe evaluar la causa de la falla, que resume la falla funcional como también definir la causa raíz de la falla u origen. Su identificación es necesaria para conectar el análisis con posibles soluciones de la raíz del problema.

Identificación de Controles Actuales

Para los equipos existentes, se identificarán y documentarán las tareas de mantenimiento (preventivas o predictivas) que se realizan actualmente para mitigar o controlar cada modo de falla. Esto permite evaluar su efectividad y decidir si deben mantenerse, modificarse o eliminarse. Para los equipos nuevos, este campo registrará los mantenimientos recomendados por el fabricante.

Las etapas de identificación de modos de falla, efectos, causas y controles se registran di-

rectamente en la hoja de trabajo del AMEF, utilizando el código asignado en el desglose jerárquico para asegurar la trazabilidad entre el componente analizado y la información registrada.

Tabla 3

Formato para la Hoja de Trabajo de Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF)

Código Equipo/Parte del Equipo	Función	Modo de Falla	Efecto de Falla	S	Causas de Falla	O	Control Actual	D	NPR
[Código]	[Función del objeto]	[Por qué falla]	[Impacto de la falla]	[1-10]	[Causa raíz]	[1-10]	[Tareas de mtto actuales]	[1-10]	[S*O*D]
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Nota. Esta hoja de trabajo detalla el proceso sistemático del análisis de fallas. Los valores de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detección (D) se utilizarán para calcular el Número de Prioridad de Riesgo (NPR).
Elaboración propia.

Para el cálculo de Número de Prioridad de Riesgo (NPR), se utilizarán las siguientes escalas de 1 a 10 para cuantificar la Severidad, Ocurrencia y la Detectabilidad:

Tabla 4

Escala de Evaluación de Severidad (S)

Severidad de fallo	Criterio	Valor de S
ÍNFIMA	No es razonable esperar que este fallo de pequeña importancia origine efecto real alguno sobre el rendimiento del sistema. Probablemente, el cliente ni se daría cuenta del fallo.	1
ESCASA	El cliente puede notar un fallo menor, pero sin provocar mayores inconvenientes.	2 - 3
BAJA	El tipo de fallo originaría un ligero inconveniente al cliente. Probablemente, éste observara un pequeño deterioro del rendimiento del sistema sin importancia. Es fácilmente subsanable.	4 - 5
MODERADA	El fallo produce cierto disgusto e insatisfacción en el cliente. El cliente observará deterioro en el rendimiento del sistema.	6 - 7
ALTA	El fallo puede ser crítico y verse inutilizado el sistema. Produce un grado de insatisfacción elevado.	8 - 9
MUY ALTA	Muy elevada. El fallo implica problemas de seguridad o de no conformidad con los reglamentos en vigor.	10

Tabla 5*Escala de Evaluación de Ocurrencia (O)*

Frecuencia	Criterio	Valor de O
ÍNFIMA	Muy escasa probabilidad de ocurrencia. Defecto inexistente en el pasado.	1
ESCASA	Escasa probabilidad de ocurrencia. Muy pocos fallos en circunstancias pasadas similares.	2 - 3
BAJA	Defecto aparecido ocasionalmente en procesos similares o previos al actual. Probablemente aparecerá algunas veces en la vida del componente/sistema.	4 - 5
MODERADA	Frecuente probabilidad de ocurrencia. En circunstancias similares anteriores el fallo se ha presentado con cierta frecuencia.	6 - 7
ALTA	Elevada probabilidad de ocurrencia. El fallo se ha presentado frecuentemente en el pasado.	8 - 9
MUY ALTA	Muy elevada probabilidad de fallo. Es seguro que el fallo se producirá frecuentemente.	10

Tabla 6*Escala de Evaluación de Detectabilidad (D)*

Detectabilidad	Criterio	Valor de D
MUY ALTA	El defecto es obvio. Resulta muy improbable que no sea detectado por los controles existentes.	1
ALTA	El defecto, aunque es obvio y fácilmente detectable, podría raramente escapar a algún control primario, pero sería posteriormente detectado.	2 - 3
MODERADA	El defecto es detectable y posiblemente no llegue al cliente. Posiblemente se detecte en los últimos estados de producción.	4 - 5
BAJA	Defectos de difícil detección que con relativa frecuencia llegan al cliente.	6 - 7
ESCASA	El defecto es de naturaleza tal, que su detección es relativamente improbable mediante los procedimientos convencionales de control y ensayo.	8 - 9
ÍNFIMA	El defecto con mucha probabilidad llegará al cliente, por ser muy difícil detectable.	10

Una vez asignados los valores de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), se

calcula el Número de Prioridad de Riesgo (NPR) mediante la siguiente relación:

$$NPR = S \times O \times D$$

Este indicador con escala posible de 1 a 1.000, permite jerarquizar los modos de falla identificados, facilitando la priorización de aquellos que requieren acciones de mejora o rediseño en los planes de mantenimiento. Los modos de falla con valores de NPR más elevados representan un mayor nivel de riesgo para la operación y, por lo tanto, deben ser analizados con mayor profundidad para definir acciones preventivas o correctivas. Estos resultados permiten establecer prioridades de intervención y sirven como insumo para la posterior definición de estrategias de mantenimiento orientadas a reducir el riesgo operacional del sistema.

6.4 Fase 4: Selección de Estrategias de Mantenimiento

Una vez comprendidas las fallas de los equipos, se seleccionará la política de gestión más adecuada utilizando la lógica de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), la cual establece que las tareas de mantenimiento deben seleccionarse en función de las consecuencias de cada modo de falla. De acuerdo con este enfoque, se evalúa si las fallas tienen impacto en seguridad, medioambiente, operación o si corresponden a fallas ocultas, permitiendo determinar la tarea técnicamente factible y efectiva para gestionarlas (Paso 5 y 6 del proceso RCM).

Las tareas de mantenimiento se agrupan en tres categorías principales, siguiendo la jerarquía de decisión establecida por la lógica RCM para la selección de tareas de mantenimiento técnicamente factibles y económicamente justificables.

1. Tareas Proactivas (Mantenimiento Preventivo y Predictivo)

Constituyen la primera opción dentro de la lógica RCM y buscan anticipar o prevenir la ocurrencia de la falla. Se seleccionan en el siguiente orden de prioridad:

- **Tareas Basadas en Condición (Predictivas):** Se evalúa si es técnicamente factible monitorear la condición del equipo para anticipar la falla (ej. análisis de vibraciones, termografía).
- **Tareas Cíclicas (Preventivas):** Si una tarea predictiva no es viable, se evalúa si existe una tarea de restauración o sustitución cíclica (basada en tiempo, horas de uso o ciclos) que sea efectiva.
- **Tareas Detectivas (Búsqueda de Fallas):** Para modos de falla ocultos (ej. sistemas de respaldo), se debe programar una tarea de comprobación funcional periódica para asegurar su disponibilidad.

2. Mantenimiento Correctivo

Si ninguna tarea proactiva (predictiva, preventiva o detectiva) es técnicamente factible o efectiva para gestionar la falla, y la falla no tiene consecuencias inaceptables (Seguridad, Medioambiente o Calidad), se adopta una política de Run-to-Failure. En el enfoque RCM, esta decisión corresponde a una elección técnica consciente cuando el costo o la complejidad de prevenir la falla supera las consecuencias asociadas a su ocurrencia.

A parte del reemplazo de componentes, se pueden considerar ciertas acciones correctivas de carácter puntual, aplicadas una única vez, como por ejemplo la implementación de recubrimientos protectores en equipos. Estas acciones pueden reducir la probabilidad de ocurrencia de

ciertos modos de falla, como daños por golpes o desgaste superficial, sin requerir necesariamente monitoreo o intervenciones periódicas posteriores.

3. Rediseño o Estandarización de Procesos

Esta constituye la última alternativa dentro de la lógica de decisión. Si el modo de falla posee consecuencias inaceptables y ninguna tarea proactiva puede mitigarlo de forma efectiva, se debe proponer un rediseño. Esto puede incluir modificaciones en el activo físico, en los procedimientos operativos (estandarización de operaciones) o en la capacitación del personal. La implementación de estas acciones queda fuera del alcance del presente estudio.

6.5 Fase 5: Diseño y Mejora de Planes de Mantenimiento

Es la fase final donde los resultados del análisis de confiabilidad se traducen en planes de mantenimiento concretos y propuestas de mejora para la gestión de los activos físicos. En esta etapa se consolidan las tareas seleccionadas mediante la lógica RCM, transformándolas en programas de mantenimiento aplicables a los equipos analizados. (Paso 7 del proceso RCM) (Moubray, 1997).

Diseño de Nuevos Planes

Para los activos físicos nuevos, las tareas seleccionadas en la Fase 4 se agruparán en gamas de mantenimiento (semanales, mensuales, anuales), definiendo para cada una su especialidad responsable, procedimiento asociado y duración estimada de ejecución.

Optimización de Planes Existentes

Para los equipos actuales, las tareas resultantes del análisis RCM (Fase 4) se compararán con las actividades definidas en el plan de mantenimiento vigente, identificadas previamente en la Fase 3, con el fin de evaluar su pertinencia y efectividad..

- Se eliminarán tareas que no aporten valor (por ejemplo, mantenimientos preventivos innecesarios o inefectivos).
- Se incorporarán tareas faltantes (como nuevas rutas predictivas o tareas detectivas).
- Se ajustarán las frecuencias de intervención según el comportamiento de falla identificado en el análisis.

Enfoque Principal de Resultados Esperados

Por último, es importante destacar que el objetivo final de esta metodología es mejorar el desempeño operacional del sistema mediante el aumento de la confiabilidad y disponibilidad de los equipos. De esta manera, la implementación de las tareas de mantenimiento propuestas busca impactar directamente en los indicadores clave de producción (KPIs), particularmente en el indicador OEE, el cual integra tres dimensiones fundamentales del desempeño operacional.

- **Disponibilidad.** Se mejora al atacar las causas raíz (identificadas en la Fase 3) de las fallas que generan detenciones, priorizadas previamente mediante los criterios críticos definidos en la Fase 2.
- **Calidad.** Se protege al mitigar los modos de falla que afectan la conformidad del producto, priorizados mediante el criterio de calidad definido en la evaluación de criticidad (Fase 2).

- **Rendimiento.** Se asegura al identificar fallas funcionales (Fase 3) que generan operación degradada, como reducción de velocidad o detenciones parciales, definiendo tareas de mantenimiento que permitan mantener las condiciones óptimas de operación.

A modo de síntesis, la metodología propuesta integra las cinco fases descritas anteriormente en un flujo lógico de trabajo. En la Figura 4 se presenta un esquema general del proceso metodológico, visualizando la interacción entre la definición del contexto operacional, la evaluación de criticidad de los activos y la selección de estrategias de mantenimiento.

Figura 4
Diagrama Explicativo Metodología

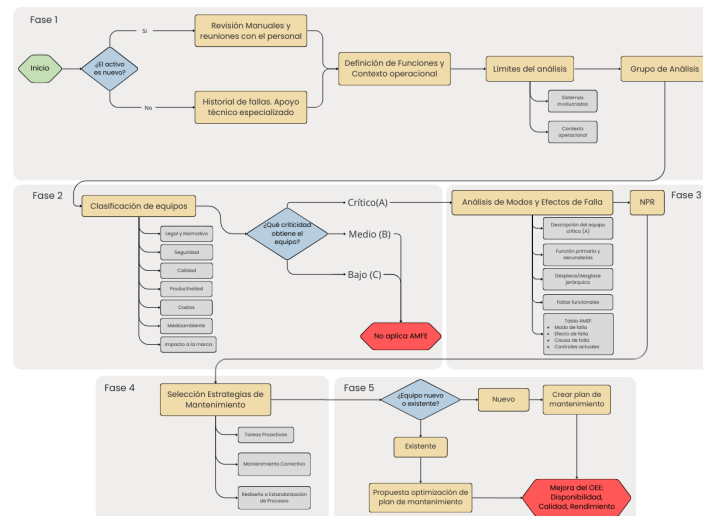


Diagrama Explicativo Fases de Metodología Propuesta. Elaboración Propia.

La metodología propuesta adopta los principios fundamentales del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), adaptando su lógica de análisis y selección de tareas a las condiciones operacionales del sistema estudiado. Sin embargo, su aplicación se adapta al contexto del estudio mediante la integración de herramientas complementarias como el análisis AMEF y la evaluación

de criticidad de activos.

Esta adaptación permite priorizar el análisis en los equipos de mayor impacto operacional y estructurar el proceso de toma de decisiones sin aplicar de forma estricta el árbol de decisión clásico de RCM, manteniendo no obstante la lógica de selección de tareas basada en la factibilidad técnica y efectividad de las estrategias de mantenimiento.

7 Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología de 5 fases descrita en el Capítulo anterior. Los resultados se exponen en el mismo orden metodológico, comenzando por la definición del contexto operacional hasta la propuesta final de los planes de mantenimiento.

7.1 Contexto Operacional y Definición de Sistemas

La planta de tratamiento de agua de la embotelladora corresponde al sistema encargado de abastecer y acondicionar el recurso hídrico utilizado en los diferentes procesos productivos y auxiliares de la instalación. Este sistema integra diversas etapas de extracción, filtración, tratamiento químico y desinfección, las cuales permiten garantizar que el agua cumpla con los estándares de calidad requeridos para su uso industrial y para la elaboración de productos.

Propósito del Sistema

La actual planta de agua de la embotelladora corresponde a un sistema crítico que cumple dos propósitos principales. El primero consiste en tratar el agua proveniente de los pozos, cumpliendo estrictos estándares internos de calidad mediante diferentes etapas de tratamiento, para posteriormente utilizar dicha agua en la producción de bebidas, aguas no gasificadas y otros bebestibles.

El segundo propósito corresponde al suministro de agua tratada para procesos industriales auxiliares dentro de la planta, tales como lavado de botellas, evaporadores, limpieza y servicios generales de las líneas de producción.

En adelante, estos dos usos se denominarán respectivamente como agua de producto y agua

de servicio. Debido a lo anterior, la planta de tratamiento de agua constituye un sistema crítico para la operación de la embotelladora, dado que la producción no puede continuar si el agua tratada no cumple con los estándares de calidad requeridos para cada uno de estos usos.

Descripción de la Planta de Agua

En un comienzo, el sistema extraía agua de 6 pozos diferentes. Sin embargo, debido a la escasez hídrica y a derrumbes de algunos pozos por uso excesivo, actualmente la planta existente extrae agua desde 5 pozos diferentes (Pozo 1, 3, 5, 6 y 7).

El agua extraída es procesada principalmente a través de diferentes etapas de tratamiento, entre las cuales se encuentran filtros de anillas y filtros de arena para la remoción de sólidos suspendidos, dosificación de hipoclorito de sodio (NaClO) para la desinfección química, procesos de ultrafiltración para la reducción de sólidos disueltos y sistemas de desinfección mediante luz ultravioleta.

Sin embargo, la planta enfrenta desafíos significativos asociados tanto a la calidad del agua de los pozos como a la cantidad de agua disponible para producción. En particular, se ha observado un deterioro progresivo en la calidad del recurso hídrico, lo que exige procesos de tratamiento cada vez más robustos para asegurar el cumplimiento de los estándares internos de calidad y garantizar la continuidad operacional del sistema.

Dentro de los principales desafíos operacionales se identifican problemas asociados a turbiedad, altos sólidos disueltos totales (TDS), presencia de arsénico presentes en todos los pozos actuales y otras especies contaminantes que deben ser monitoreadas, tales como arcillas, óxidos de hierro y contaminación microbiológica.

Estos problemas de calidad del agua de entrada impactan directamente en la eficiencia del

sistema actual, evidenciándose una eficiencia global del proceso cercana al 79 %, lo que genera aproximadamente 129 m³/h de agua perdida en drenajes.

Frente a esta problemática surge el proyecto denominado Master Plan de Agua, impulsado por la gerencia de ingeniería, cuyo objetivo es rediseñar y modernizar integralmente el sistema de tratamiento de agua. Su propósito principal es mejorar la eficiencia y confiabilidad del suministro de agua frente a las condiciones actuales de calidad de los pozos.

Este nuevo plan se centra en la implementación de tecnologías más avanzadas para la recuperación y tratamiento del agua, basándose en los resultados exitosos de un proyecto piloto que alcanzó eficiencias entre un 92 % y un 95 %. Dichos resultados se obtuvieron mediante pruebas realizadas con el pozo más reciente de la planta (Pozo 7), incorporando un sistema de recuperación de agua (PTR) y un sistema de recuperación (WUR).

Como resultado de esta nueva configuración, se proyecta reducir el drenaje hacia alcantarillado desde aproximadamente 129 m³/h a cerca de 55 m³/h. Además, se incorpora una nueva etapa de ultra-filtración con una capacidad de 480 m³/h, que actuará como una etapa clave de pretratamiento del proceso existente.

Adicionalmente, el proyecto contempla la incorporación adicional de sistemas de desinfección mediante luz ultravioleta (UV), nuevos analizadores de arsénico y cloro, abatidores de arsénico y un sistema de automatización integral de la planta, incluyendo monitoreo en tiempo real de variables críticas tales como pH, turbidez, caudal, presión y niveles de arsénico, junto con la implementación de un sistema SCADA para centralizar el control y supervisión del proceso.

Estas mejoras permitirán aumentar el caudal operacional disponible tanto para agua de producto como para agua de servicio, alcanzando aproximadamente 450 m³/h y 204 m³/h respectivamente.

En este contexto, la planta de tratamiento de agua y los equipos que componen este proyecto constituyen elementos fundamentales para la continuidad operacional de la embotelladora. Por esta razón, resulta necesario identificar los equipos más críticos dentro del sistema para priorizar su análisis mediante herramientas de confiabilidad, lo que se desarrolla en la siguiente fase a través de la evaluación de criticidad de los activos.

Funciones de los Sistemas Principales

Como resultado del levantamiento de información realizado en la planta de agua, se identifican los principales sistemas que componen el proceso de captación, tratamiento y almacenamiento del recurso hídrico. Cada uno de estos sistemas cumple funciones específicas dentro del proceso de acondicionamiento del agua para su uso en la operación industrial.

- **Sistemas de Captación.** Conformado por los pozos 1, 3, 5, 6 y 7, los cuales extraen agua subterránea (agua cruda) y constituyen la fuente principal de abastecimiento de la planta.
- **Sistema de Pretratamiento y Filtración.** Compuesto por filtros de anillas de 200 micras y filtros de arena de 5 micras, los cuales realizan una filtración física inicial removiendo sólidos suspendidos de mayor tamaño, como arenas y partículas finas presentes en el agua cruda.
- **Sistema de Desinfección Química.** Incluye el tanque de acumulación de 300 m³ (LB01), donde se realiza la dosificación de hipoclorito de sodio (NaClO), permitiendo la eliminación de microorganismos presentes en el agua.
- **Sistemas de Filtración Avanzada por Membranas.** Conformado por los sistemas de nanofiltración y ultrafiltración, los cuales permiten remover sólidos disueltos, compuestos orgá-

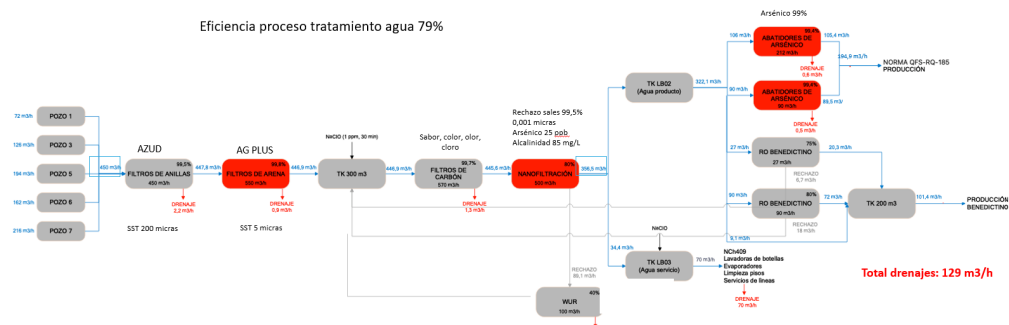
nicos y partículas de menor tamaño, mejorando significativamente la calidad del agua antes de su distribución o tratamiento específico.

- **Sistema de tratamiento específico y purificación.** Incluye los abatidores de arsénico, los sistemas de ablandamiento y las plantas de ósmosis inversa (RO), utilizados para remover contaminantes específicos, reducir la concentración de sales disueltas y asegurar el cumplimiento de los estándares de calidad requeridos para agua de producto y agua destinada a la línea Benedictino.
- **Sistema de recuperación de agua.** Representado por la unidad de recuperación de agua (WUR), la cual permite recuperar aproximadamente un 40 % del agua de rechazo proveniente de los procesos de filtración por membranas, reutilizándola principalmente como agua de servicio dentro de la planta, contribuyendo a mejorar la eficiencia global del sistema.
- **Sistema de desinfección.** Conformado por los equipos de desinfección mediante luz ultravioleta (UV), los cuales permiten eliminar microorganismos remanentes presentes en el agua tratada antes de su almacenamiento o distribución hacia los distintos procesos productivos.
- **Sistema de almacenamiento y distribución.** Conformado por los tanques de almacenamiento LB01, LB02, LB03, LB04, LB05 y el tanque de 200 m³, junto con el sistema de bombeo asociado, los cuales permiten almacenar el agua tratada y distribuirla hacia los diferentes procesos productivos de la planta.
- **Sistema de monitoreo y control.** Integrado por los analizadores de arsénico, hierro y cloro, los cuales permiten monitorear en línea parámetros críticos de calidad del agua, contribuyendo al control operacional del sistema de tratamiento.

La interacción entre los sistemas descritos define la configuración operativa de la planta de tratamiento de agua. Con el fin de facilitar la comprensión del proceso y de los flujos de tratamiento presentes en la instalación, se presenta a continuación el diagrama general del sistema en su configuración actual de operación.

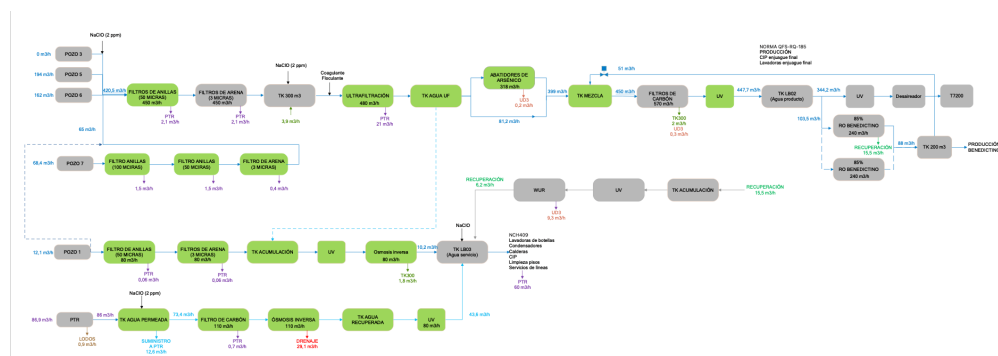
La Figura 5 muestra el esquema del proceso existente de captación, tratamiento y almacenamiento de agua utilizado actualmente en la planta.

Figura 5
Diagrama de Flujo Planta de Agua



Posteriormente, la Figura 6 presenta el diagrama correspondiente a la configuración proyectada de la planta en el marco del proyecto denominado Master Plan de Agua, el cual incorpora nuevas etapas de tratamiento, sistemas de recuperación y mejoras en la automatización del proceso.

Figura 6
Diagrama de Flujo Planta de Agua Proyecto Master Plan



Nota. El proyecto consta de los elementos representados en los bloques verdes ilustrados, y se observa cómo se integran al proceso completo.

La comparación entre ambas configuraciones permite identificar las principales modificaciones tecnológicas introducidas en el sistema, así como los nuevos subsistemas que deberán ser considerados dentro del análisis de confiabilidad y mantenimiento desarrollado en esta investigación. Entre los cambios más relevantes se encuentra la incorporación de nuevas etapas de tratamiento mediante ultrafiltración, la implementación de sistemas de recuperación de agua como WUR y PTR, la incorporación de nuevos sistemas de desinfección y monitoreo en línea, así como una mayor automatización del proceso mediante sistemas de control y supervisión SCADA.

Estas mejoras buscan aumentar la eficiencia global del proceso de tratamiento de agua, reducir las pérdidas operacionales y mejorar la confiabilidad del suministro de agua para los distintos procesos productivos de la planta. Asimismo, la incorporación de nuevos equipos y sistemas tecnológicos genera la necesidad de revisar y redefinir las estrategias de mantenimiento aplicadas a estos activos, lo cual justifica el desarrollo del presente estudio.

Límites del Análisis

Con el objetivo de delimitar el alcance operativo del estudio dentro del sistema de tratamiento de agua, se establecieron los límites del análisis considerando los equipos directamente asociados a los procesos de captación, tratamiento y distribución de agua utilizados para producción y servicios en la planta.

En este sentido, el análisis se centra en los sistemas principales que participan en el proceso de tratamiento de agua proveniente de los pozos, incluyendo las etapas de pretratamiento, filtración, desinfección, almacenamiento y distribución. Asimismo, se consideran los nuevos sistemas incorporados mediante el proyecto Master Plan de Agua, los cuales forman parte del rediseño del sistema de tratamiento.

Por otra parte, se excluyen del análisis los procesos asociados al tratamiento completo del sistema de recuperación de rieles (PTR), dado que estos corresponden a un subsistema independiente cuyo funcionamiento no impacta directamente en la continuidad operacional del sistema principal de abastecimiento de agua para producción.

De esta manera, el estudio se concentra en los equipos que tienen una incidencia directa en la disponibilidad, calidad y continuidad del suministro de agua hacia los procesos productivos de la embotelladora.

En términos de profundidad del análisis, se realizará una evaluación de criticidad para el conjunto de equipos identificados en el sistema, mientras que el análisis detallado mediante AMEF se aplicará exclusivamente a aquellos equipos clasificados como críticos según los criterios definidos en la metodología.

Equipo de Análisis AMEF

El desarrollo del análisis de criticidad y del posterior análisis AMEF se realizó con el apoyo de personal clave de la planta, perteneciente principalmente a las áreas de ingeniería, mantenimiento y suministros.

La participación de estas áreas permitió integrar distintas perspectivas del sistema, considerando tanto el diseño de los equipos y procesos, como la experiencia operativa y el conocimiento asociado a la gestión de repuestos y recursos técnicos.

En particular, el área de ingeniería aporta la comprensión del diseño y funcionamiento esperado de los sistemas, el área de mantenimiento contribuye con la experiencia práctica asociada a fallas históricas y comportamiento operativo de los equipos, mientras que el área de suministros entrega información relevante respecto a disponibilidad de repuestos y criticidad logística de los

componentes.

La colaboración entre estas áreas permitió realizar una evaluación más realista de los modos de falla, sus causas y efectos, así como de la priorización de los equipos dentro del sistema de tratamiento de agua.

7.2 Evaluación de Criticidad de Equipos

Con el objetivo de priorizar los equipos del sistema de tratamiento de agua que presentan mayor impacto sobre la operación de la planta, se aplicó la matriz de criticidad definida en la metodología.

A partir del levantamiento de información del sistema actual y del proyecto Master Plan de Agua, se identificaron los principales equipos y subsistemas que participan en el proceso de captación, tratamiento, almacenamiento y distribución de agua dentro de la planta.

Tabla 7*Sistemas y equipos considerados en la evaluación de criticidad*

Sistema	Equipo
Captación	Pozos 1, 3, 5, 6, 7
Pretratamiento y Filtración	Filtros anillas Filtros arena Filtros Azud AGPlus Filtros Multimedia
Desinfección Química	Sistema Inyección Cloro
Filtración Avanzada por Membranas	Planta 1 (Nanofiltración) Planta 2 (Nanofiltración) Ultrafiltración
Tratamiento Específico y Purificación	Planta RO N°1 (A. Producto) Planta RO N°2 (A. Servicio)
Recuperación de agua	Planta N°1 WUR Planta N°2 WUR Estanque WUR alimentación y rechazo
Desinfección	UV Desaireador A, B, C Uv Nanofiltración 1 Uv Nanofiltración 2 Uv Tk200m3 (Benedictino) Uv LB03 Uv Planta R0 1 Uv Planta RO 2 Uv LB04 Uv LB05
Almacenamiento y distribución	Tanque 200 m ³ LB01 Agua Producción LB02 Agua Servicio LB03 Mezcla UF LB04 Mezcla Abatidores LB05
Monitoreo y Control	Analizador de Arsénico Analizador de Hierro Analizador de Cloro

Los equipos identificados en la Tabla 13 corresponden a los principales activos físicos del sistema de tratamiento de agua de la planta. Estos equipos fueron considerados como base para la aplicación de la matriz de criticidad definida en la metodología.

La evaluación de criticidad se realizó mediante un modelo semi-cuantitativo basado en el juicio del personal de la planta, obtenido a partir de sesiones de análisis con encargados de las áreas de operación y mantenimiento.

El modelo considera seis dimensiones de impacto: seguridad, calidad del producto, productividad, costos operacionales, impacto ambiental e impacto a la marca. La combinación de estos criterios permite obtener un valor de criticidad total para cada equipo evaluado.

El objetivo de esta evaluación es priorizar los esfuerzos de gestión de mantenimiento, enfocando el análisis posterior en aquellos equipos clasificados como críticos (A), quedando fuera del análisis los equipos de criticidad media (B) y equipos de baja criticidad (C).

Para facilitar la aplicación del modelo de criticidad, en la Tabla 1 se presentan los criterios de evaluación, sus escalas de impacto y la ponderación asociada a cada dimensión considerada en el análisis.

Tabla 8
Matriz de Evaluación de Criticidad

Nombre Equipo	Legal (1-5)	Seguridad (1-5)	Calidad (1-5)	Productividad (1-5)	Costos (1-5)	Medioambiente (1-5)	Impacto a la marca (1-5)	Valor Criticidad (Promedio)	Nivel de Criticidad (Clasificación)
Planta 1 (Nanofiltración)	1	2	3	3	5	3	2	2,9	C
Planta 2 (Nanofiltración)	1	2	3	3	5	3	2	2,9	C
Planta RO N°1	1	1	1	1	1	3	1	1,2	C
Planta RO N°2	1	2	2	5	5	3	2	3,0	B
Planta N°1 WUR	1	2	2	5	5	3	2	3,0	B
Planta N°2 WUR	1	2	2	5	5	3	2	3,0	B
Desaireador t 650 a	1	4	3	2	2	1	3	2,8	C
Desaireador t 650 b	1	4	3	2	2	1	3	2,8	C
Desaireador t 650 c	1	4	3	2	2	1	3	2,8	C
Sistema Inyección Cloro	5	4	5	5	2	3	4	5,0	A
Pozo N°1	1	2	2	4	5	4	4	3,0	B
Pozo N°3	1	2	2	3	5	4	4	2,8	C
Pozo N°5	1	2	2	3	5	4	4	2,8	C
Pozo N°6	1	2	2	3	5	4	4	2,8	C
Pozo N°7	1	2	2	3	5	4	4	2,8	C
Uv Plantas RO 1	1	4	5	1	3	1	1	3,2	B
Uv Tk200m3	1	4	5	5	3	1	1	4,0	A
Uv LB03	1	4	5	1	3	1	1	3,2	B
Uv Estanque LB04	1	4	5	4	3	1	1	3,8	A
Uv Estanque LB05	1	4	5	4	3	1	1	3,8	A
Uv Multimedia 1	1	4	5	4	3	1	1	3,8	A
Uv Multimedia 2	1	4	5	4	3	1	1	3,8	A
UV DESAIREADOR A	1	4	5	2	3	1	1	3,4	B
UV DESAIREADOR B	1	4	5	2	3	1	1	3,4	B
UV DESAIREADOR C	1	4	5	2	3	1	1	3,4	B
Tanque 200 m3	1	2	1	5	5	3	2	2,7	C
Tanque 300 m3 LB01	1	2	1	5	5	3	2	2,7	C
Estanque Agua Produccion LB02	1	2	1	5	5	3	2	2,7	C
Estanque Agua Servicio LB03	1	2	1	5	5	3	2	2,7	C
Estanque Mezcla UF LB04	1	2	1	5	5	3	2	2,7	C
Estanque Agua Mezcla Abatidores LB05	1	2	1	5	5	3	2	2,7	C
Estanque WUR alimentación y rechazo	1	2	1	3	5	3	2	2,3	C
Filtros Multimedia	1	2	4	5	2	3	2	3,3	B
Filtros AGPlus	1	2	2	2	2	3	2	2,1	C
Filtros Azud	1	2	2	2	2	3	2	2,1	C
Filtro anillas pozo 7	1	2	3	5	2	3	2	3,0	B
Filtro arenas pozo 7	1	2	3	5	2	3	2	3,0	B
Filtro anillas pozo 1 (A. Servicio)	1	2	3	5	2	3	2	3,0	B
Filtro arenas pozo 1 (A. Servicio)	1	2	3	5	2	3	2	3,0	B
Sistema Bombas (desde tk300)	1	5	1	1	3	1	1	2,2	C
Sistema ablandadores vigaflow y voens	1	3	5	1	2	1	2	2,9	C
Abatidores de arsénico	5	4	5	3	5	2	2	5,0	A
Ultrafiltración	1	4	5	5	5	3	5	4,6	A
Analizador de arsénico	1	4	5	2	4	2	2	3,6	B
Analizador de hierro	1	4	5	2	4	2	2	3,6	B
Analizador de cloro tk300	1	3	5	2	3	2	2	3,3	B
Analizador de cloro LB03	1	3	5	2	3	2	2	3,3	B

Los resultados obtenidos en la Tabla 8 permiten identificar el nivel de impacto relativo de cada equipo dentro del sistema de tratamiento de agua.

Se observa que la mayor parte de los equipos se concentra en niveles de criticidad media (B) y baja (C), lo que indica que, si bien su falla puede afectar la operación, existen mecanismos de redundancia o alternativas operacionales que reducen su impacto sobre la continuidad del proceso productivo.

A modo de resumen, se observa que aproximadamente el 19 % de los equipos evaluados

se clasifican en criticidad alta (A) los cuales podrían generar efectos significativos sobre la calidad del agua y continuidad operacional, mientras que el 36 % corresponde a criticidad media (B) y el 45 % restante a criticidad baja (C).

Tal como se establece en el alcance de la investigación, el análisis de modos y efectos de falla (AMEF) se desarrollará únicamente para los equipos clasificados con criticidad alta, los cuales presentan mayor impacto potencial sobre la continuidad del proceso productivo. Esto permite enfocar el análisis detallado en un número acotado de activos críticos, optimizando los esfuerzos de gestión de mantenimiento. A partir de esta clasificación, en la Tabla 9 se presentan los equipos que fueron identificados con criticidad alta (A).

Tabla 9

Equipos clasificados con criticidad alta (A)

Equipo	Valor de criticidad	Clasificación
Sistema Inyección Cloro	5,0	A
UV Multimedia 1 (Nano)	3,8	A
UV Multimedia 2 (Nano)	3,8	A
UV Tk200m3 (Benedictino)	4,0	A
UV Estanque LB04	3,8	A
UV Estanque LB05	3,8	A
Abatidores de arsénico	5,0	A
Ultrafiltración	4,6	A

Los equipos identificados en la Tabla 9 corresponden a los activos con mayor nivel de impacto dentro del sistema evaluado.

A partir de esta selección, en la sección siguiente se desarrollará el análisis de modos y efectos de falla (AMEF) para cada uno de estos equipos, con el fin de identificar sus principales modos de falla y los riesgos asociados a su operación.

Análisis de criticidad interna para Ultrafiltración

Debido a que el sistema de Ultrafiltración (UF) constituye un sistema de gran envergadura dentro del proceso de tratamiento de agua, la aplicación directa del análisis AMEF a todos los equipos que lo componen resultaría excesivamente extenso y dificultaría focalizar el análisis en las fallas realmente críticas del sistema.

En este contexto, el sistema de ultrafiltración puede considerarse como un activo global dentro de la planta el cual ya fué evaluado como crítico, el cual opera de manera integrada y autónoma dentro del proceso general de tratamiento de agua. En términos operacionales, el sistema UF funciona como una unidad de proceso completa, compuesta por múltiples subsistemas que incluyen módulos de membranas, sistemas de bombeo, equipos de limpieza, sistemas de aire, instrumentación y sistemas de control.

Esta configuración puede observarse en el plano del proceso de ultrafiltración presentado en el Anexo A, donde se identifican cuatro líneas de ultrafiltración, cada una compuesta por 27 módulos de membrana, además de un contenedor de control que integra los sistemas de automatización y los equipos auxiliares necesarios para la operación del sistema.

Dado el número y la diversidad de equipos involucrados, resulta metodológicamente adecuado realizar un análisis de criticidad interna del sistema de ultrafiltración y así identificar los subsistemas y equipos que presentan mayor impacto sobre la continuidad operacional, la calidad del agua tratada y la confiabilidad del proceso.

Por último, el listado completo de componentes se encuentra en el Anexo B, del cual se observa que tiene muchos componentes similares o repetidos, por lo que lo correcto es poder agruparlos funcionalmente hablando para su análisis de criticidad.

Tabla 10

Equipos considerados en la evaluación de criticidad específica para el sistema de ultrafiltración

Sistema	Equipo
Ultrafiltración	Membranas de ultrafiltración
	Carcasa / módulos de ultrafiltración
	Bombas de alimentación UF
	Bombas de retrolavado (Backwash /CEB)
	Bombas CIP
	Sistema de válvulas automáticas
	Sistema de válvulas manuales
	Caudalímetros
	Transmisores de presión
	Turbidímetro UF
	Sistema de control PLC/HMI
	Sistema de aire comprimido para válvulas
	Tanque CIP/químicos
	Resistencias de calentamiento CIP
	Contenedor de ultrafiltración
	Sistema de drenaje UF

Con el anterior listado, se representan todos los equipos del sistema sin tener que repetir componentes menores. A partir de este agrupamiento, se realiza el análisis de criticidad para dichos equipos:

Tabla 11

Matriz de Evaluación de Criticidad Interna del Sistema de Ultrafiltración

Nombre Equipo	Legal	Seguridad	Calidad	Productividad	Costos	Medioambiente	Impacto marca	Valor Criticidad	Nivel
Membranas de ultrafiltración	5	4	5	5	5	3	4	5	A
Módulos / carcasas de ultrafiltración	1	3	5	4	3	3	4	3,9	A
Bombas de alimentación UF	1	4	4	5	5	3	3	4,2	A
Bombas de retrolavado (BW / CEB)	1	3	4	4	4	3	3	3,6	B
Bombas CIP	1	3	3	3	4	3	3	3,1	B
Sistema de válvulas automáticas	1	2	4	4	3	2	3	3,2	B
Sistema de válvulas manuales	1	3	3	4	3	2	3	3,1	C
Caudalímetros UF	1	2	4	3	2	2	2	2,8	C
Transmisores de presión UF	1	2	4	3	2	2	2	2,8	C
Turbidímetro UF	1	2	5	3	2	2	2	3,1	B
Sistema PLC / HMI	1	4	5	5	4	3	3	4,4	A
Sistema de aire comprimido UF	1	4	4	4	4	3	2	3,8	A
Tanque CIP / químicos	1	3	3	3	3	2	2	2,9	C
Resistencias de calentamiento CIP	1	2	2	2	2	2	2	2,0	C
Contenedor sistema UF	1	2	2	2	2	2	2	2,0	C
Sistema de drenaje UF	1	2	2	2	2	3	3	2,2	C

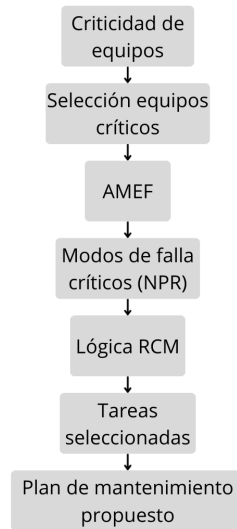
Tabla 12*Equipos clasificados con criticidad alta (A) para Ultrafiltración*

Equipo	Valor de criticidad	Clasificación
Membrana de ultrafiltración	5,0	A
Sistema PLC/HMI	4,4	A
Bombas de alimentación UF	4,2	A
Módulos/carcasas de ultrafiltración	3,9	A
Sistema de aire comprimido UF	3,8	A

Los equipos identificados en la Tabla 12 corresponden a los activos con mayor nivel de impacto dentro de Ultrafiltración.

En coherencia con el criterio aplicado para la selección de equipos críticos a nivel planta, en la sección siguiente también se desarrollará el análisis de modos y efectos de falla (AMEF) para cada uno de estos equipos partícipes del sistema de Ultrafiltración, con el fin de identificar sus principales modos de falla y los riesgos asociados a su operación.

En la Figura 7 se presenta de forma esquemática la trazabilidad metodológica seguida en el estudio, mostrando cómo la evaluación de criticidad constituye el punto de partida para priorizar los equipos a analizar y estructurar el trabajo posterior. A partir de esta secuencia, se observa cómo cada etapa del análisis se traduce progresivamente en la selección de estrategias de mantenimiento técnicamente justificadas.

Figura 7*Trazabilidad metodológica***7.3 Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF)**

Una vez identificados los equipos con mayor nivel de criticidad dentro del sistema de tratamiento de agua, se procede al desarrollo del análisis de modos y efectos de falla (AMEF) para aquellos activos clasificados con criticidad alta (A).

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 9, se identificaron nueve equipos críticos dentro del sistema. Estos equipos corresponden a aquellos cuya falla podría generar mayores consecuencias sobre la continuidad operacional, la calidad del agua tratada o el cumplimiento de los estándares sanitarios de la planta.

Los equipos considerados para el desarrollo del análisis AMEF son los siguientes:

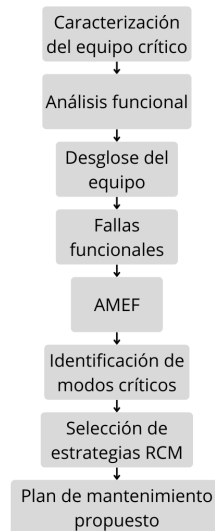
Tabla 13*Equipos resultantes de la evaluación de criticidad, para análisis AMEF*

Sistemas
Sistema de Inyección de Cloro
Sistemas de desinfección UV
Abatidores de arsénico
Sistema de Ultrafiltración

Es importante señalar que, dentro de los resultados de criticidad, se identificaron diferentes equipos de desinfección UV ubicados en diferentes puntos del proceso, tales como UV Multimedia 1, UV Multimedia 2, UV TK200m³, UV Estanque LB04 y UV Estanque LB05, entre otros. Sin embargo, estos equipos corresponden al mismo tipo de tecnología y principio de operación equivalente. Con ello, el análisis AMEF se desarrollará considerando el equipo de desinfección UV como un sistema representativo, cuyos resultados son extrapolables a las demás unidades de la planta dado que es el mismo equipo.

De este modo, se llevarán a cabo cinco análisis en total, cada uno con el nivel de complejidad y profundidad que se detalla en esta sección.

Para trabajar cada equipo en esta sección de AMEF, se realizarán los pasos mostrados en la Figura 8 para cada uno de los equipos de manera conjunta para no confundir al lector.

Figura 8*Modo de trabajo sección AMEF****Sistema de Inyección de Cloro.***

El sistema de inyección de cloro corresponde al conjunto de equipos encargado de realizar dosificación controlada de hipoclorito de sodio (NaClO) en el sistema de tratamiento de agua de la planta. Su función principal es asegurar la desinfección química del agua mediante la eliminación o inactivación de microorganismos potencialmente presentes en el recurso hídrico, garantizando el cumplimiento de los estándares sanitarios requeridos para el proceso productivo.

Función Primaria. En cuanto a su función principal corresponde a dosificar hipoclorito de sodio en el flujo de agua tratada para asegurar la desinfección microbiológica y mantener los estándares sanitarios establecidos para el proceso productivo.

Función Secundaria. Además de su función principal, el sistema debe cumplir funciones secundarias que permitan asegurar sus operaciones:

- Mantener una dosificación estable y controlada de NaClO de acuerdo a los parámetros operacionales definidos para el proceso de tratamiento de agua.
- Permitir la regulación y ajuste de la dosificación en función de la calidad del agua de entrada y de los requerimientos operacionales.
- Garantizar la disponibilidad continua del agente desinfectante, evitando interrupciones en el proceso de desinfección.
- Evitar fugas o liberación no controlada de hipoclorito, reduciendo riesgos asociados a seguridad y medioambiente.
- Permitir el monitoreo del proceso de desinfección, mediante la interacción con los sistemas de medición de cloro residual presentes en la planta.

Este sistema se compone principalmente de bombas dosificadoras, válvulas de control y sistema de monitoreo asociados a la concentración de cloro en el agua tratada. Con el objetivo de identificar de manera estructurada los elementos que componen el sistema de desinfección ultravioleta (UV), se realizó un desglose jerárquico del equipo, el cual permite organizar los principales subsistemas y componentes involucrados en el proceso de desinfección.

Tabla 14*Desglose jerárquico del sistema de inyección de cloro*

CÓDIGO I	NIVEL I	CÓDIGO II	NIVEL II	CÓDIGO III	NIVEL III
1	Sistema de inyección de cloro	1.1	Almacenamiento de cloro	1.1.1	Estanque de hipoclorito de sodio
		1.2	Sistema de dosificación	1.2.1	Bomba dosificadora de cloro
		1.3	Sistema de inyección	1.3.1	Línea de inyección de cloro a proceso
		1.4	Sistema de monitoreo y control	1.4.1	Analizador de cloro residual

Nota. El desglose jerárquico se define sólo hasta nivel de equipo. Elaboración propia.

A partir de este desglose, se identifican los principales elementos que participan en el proceso de dosificación, tales como el sistema de almacenamiento del agente químico, el sistema de dosificación mediante bomba dosificadora, la línea de inyección hacia el proceso y el sistema de monitoreo del cloro residual en el agua tratada.

Fallas Funcionales. A partir de las funciones identificadas, es posible definir las fallas funcionales asociadas al sistema de inyección de cloro, las cuales representan las condiciones en las que el sistema no es capaz de cumplir total o parcialmente su función dentro del proceso de tratamiento de agua:

Tabla 15

Fallas Funcionales Sistema de Inyección de Cloro

Función	Falla Funcional
Dosificar hipoclorito al proceso	Incapacidad de dosificar hipoclorito
Dosificar hipoclorito dentro del rango operacional requerido	Dosificación fuera del rango operacional
Contener el agente químico dentro del sistema	Fuga de hipoclorito en el sistema

A partir de las funciones identificadas y de las fallas funcionales asociadas, es posible analizar con mayor detalle los modos de falla potenciales que pueden presentarse en los distintos elementos que componen el sistema de inyección de cloro.

Para ello, se completa a continuación la hoja de trabajo ubicada en la Tabla 3 de la metodología. En ella, se identifican los modos de falla, sus causas, los efectos sobre la operación del sistema, controles actuales y el nivel de riesgo asociado mediante el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR) definido bajo los parámetros indicados en las tablas 4, 5 y 6 de la metodología.

Hoja AMEF para Sistema de Inyección de Cloro. Con el objetivo de identificar los principales modos de falla asociados al sistema de inyección de cloro, se aplicó la metodología de análisis de modos y efectos de falla (AMEF) la cual se presenta en el Anexo C.

Tabla 16

Modos de Falla Críticos del Sistema de Inyección de Cloro

Modo de Falla	Equipo	NPR
Válvula de inyección bloqueada	Línea de inyección	192
Dosificación incorrecta	Bomba dosificadora	160
Nivel insuficiente estanque	Estanque hipoclorito	128
Pérdida de cebado	Bomba dosificadora	128
Analizador sin señal	Analizador de cloro	128

Nota. Modos de falla con mayor NPR identificados para el sistema.

A partir del cálculo del número de prioridad de riesgo (NPR), fue posible identificar los modos de falla con mayor impacto potencial en la operación del sistema. Los valores más elevados de NPR se asocian principalmente a fallas relacionadas con la dosificación e inyección del hipoclorito, destacando la obstrucción de la válvula de inyección y la dosificación incorrecta de la bomba dosificadora. Asimismo, se identificaron riesgos relevantes asociados al monitoreo del proceso, particularmente en el analizador de cloro residual, cuya pérdida de señal o lecturas incorrectas podrían afectar la capacidad de supervisión del proceso de desinfección.

Estos resultados permiten priorizar los componentes del sistema que requieren mayor atención dentro de las estrategias de mantenimiento y control operacional.

Sistema de Desinfección Ultravioleta (UV)

El sistema de desinfección ultravioleta corresponde a una unidad diseñada para la inactivación microbiológica del agua mediante radiación ultravioleta (UV). Este proceso se basa en la

exposición del agua a radiación germicida, la cual altera el material genético de los microorganismos presentes, impidiendo su reproducción y capacidad de infección.

El sistema está compuesto principalmente por un reactor UV, lámparas ultravioleta, sensores, balastos eléctricos y un conjunto de componentes asociados que permiten el control y operación del proceso. La configuración del reactor y de las lámparas permite optimizar la exposición del flujo de agua a la radiación germicida, favoreciendo la eficiencia del proceso de desinfección.

Para asegurar su correcto funcionamiento, el sistema requiere condiciones hidráulicas y operacionales específicas, tales como mantener el reactor completamente lleno de agua, evitar la acumulación de aire en el sistema, controlar adecuadamente el caudal de operación y disponer de una alimentación eléctrica estable. Asimismo, el sistema incorpora accesorios como válvulas de aislamiento, caudalímetros, válvulas de muestreo y dispositivos de degasificación, los cuales permiten realizar tareas de monitoreo, mantenimiento y control del proceso de desinfección.

Función Primaria. La función primaria del sistema de desinfección ultravioleta es inactivar microorganismos presentes en el agua mediante la aplicación de radiación ultravioleta, asegurando la reducción de la carga microbiológica del efluente tratado y contribuyendo al cumplimiento de los estándares sanitarios y de calidad establecidos para el agua tratada.

Función Secundaria. Además de su función principal, el sistema de desinfección ultravioleta cumple con las siguientes funciones secundarias dentro del proceso de tratamiento:

- Permitir el paso controlado del caudal de agua a través del reactor UV, asegurando el tiempo de contacto necesario con la radiación ultravioleta para lograr la desinfección.
- Monitorear las condiciones operacionales del sistema, tales como caudal, estado de las lám-

paras y parámetros eléctricos asociados al funcionamiento del equipo.

- Mantener condiciones hidráulicas adecuadas dentro del reactor, evitando la acumulación de aire o variaciones que puedan afectar la eficiencia del proceso.
- Facilitar las labores de operación, control y mantenimiento del sistema, mediante la incorporación de dispositivos como válvulas de aislamiento, válvulas de muestreo y elementos de drenaje.

Con el objetivo de identificar de manera estructurada los elementos que componen el sistema de desinfección ultravioleta UV, se realizó un desglose jerárquico del equipo, el cual permite organizar los principales subsistemas y equipos involucrados en el proceso de dosificación.

Tabla 17

Desglose Jerárquico del Sistema de Desinfección UV

CÓDIGO I	NIVEL I	CÓDIGO II	NIVEL II	CÓDIGO III	NIVEL III
1	Sistema de Desinfección UV	1.1	Subsistema hidráulico	1.1.1	Cámara de Desinfección
				1.1.2	Bridas y conexiones sanitarias
				1.1.3	Sellos y O-rings
		1.2	Subsistema de radiación UV	1.2.1	Lámpara UV
				1.2.2	Manguito de cuarzo
				1.2.3	Sensor UV (UVIS)
		1.3	Subsistema eléctrico de potencia	1.3.1	Balasto electrónico
				1.3.2	Cableado
		1.4	Subsistema de control	1.4.1	Módulo de control / HMI
				1.4.2	Software / lógica de control
				1.4.3	Alarmas y eventos
		1.5	Subsistema de limpieza	1.5.1	Módulo ultrasónico de limpieza
				1.5.2	Fuente de poder limpieza

Nota. Este formato permite una identificación estructurada de todos los equipos y sus componentes que serán sujetos al análisis AMEF. Elaboración propia.

A partir de este desglose se identifican los principales componentes del sistema de desinfección ultravioleta, tales como la lámpara UV, el manguito de cuarzo, el sensor de intensidad UV, el balasto electrónico y los elementos de control del sistema. La identificación de estos componentes permite posteriormente establecer los modos de falla asociados a cada uno de ellos dentro del

análisis AMEF.

Fallas Funcionales. Las fallas funcionales corresponden a situaciones en las cuales el sistema es incapaz de cumplir total o parcialmente las funciones para las cuales fue diseñado. En el sistema de desinfección ultravioleta, estas fallas se relacionan principalmente con la pérdida de capacidad para asegurar la desinfección del agua o con la incapacidad de mantener las condiciones operacionales necesarias para el proceso. En este contexto, se identifican las siguientes posibles fallas funcionales:

Tabla 18

Fallas Funcionales Sistema de Desinfección UV

Función	Falla Funcional
Desinfectar el agua mediante radiación ultravioleta	Incapacidad de desinfectar el agua
Desinfectar el agua dentro del rango de dosis UV requerido	Desinfección fuera del rango de dosis UV requerido
Permitir el paso del agua a través del reactor UV	Incapacidad de permitir el paso del agua
Contener el agua dentro del sistema de desinfección UV	Fuga de agua en el sistema
Monitorear la intensidad de radiación UV del sistema	Incapacidad de monitorear la intensidad UV
Mantener condiciones operacionales adecuadas para el proceso de desinfección	Operación fuera de las condiciones operacionales requeridas

Hoja AMEF para Sistema de Desinfección Ultravioleta (UV). Desde la metodología de análisis de modos y efectos de falla (AMEF) expuesto en el Anexo D podemos destacar los siguientes modos de falla:

Tabla 19

Modos de Falla Críticos del Sistema de Desinfección Ultravioleta (UV)

Modo de Falla	Equipo	NPR
Incrustación o ensuciamiento del manguito de cuarzo	Manguito de cuarzo	192
Sensor fuera de calibración	Sensor UV	180
Pérdida de intensidad de radiación UV	Lámpara UV	162
Acumulación de aire en el reactor	Cámara de desinfección	140
Desgaste o ruptura de O-rings	Sellos y O-rings	140
Falla del sistema de limpieza ultrasónica	Módulo ultrasónico de limpieza	140

Nota. Modos de falla con mayor NPR identificados para el equipo UV.

El análisis AMEF permitió identificar los modos de falla con mayor criticidad dentro del sistema de desinfección ultravioleta. Los mayores valores de NPR corresponden al ensuciamiento del manguito de cuarzo (NPR = 192), la descalibración del sensor de intensidad UV (NPR = 180) y la pérdida de intensidad de la lámpara UV (NPR = 162). Estos resultados indican que los componentes asociados a la transmisión y monitoreo de la radiación ultravioleta representan los elementos más críticos del sistema. En consecuencia, dichos componentes serán considerados prioritarios en la definición de las tareas de mantenimiento dentro del análisis RCM.

Abatidores de arsénico

El sistema de abatimiento de arsénico corresponde a una etapa del proceso de tratamiento de agua utilizada para remover arsénico presente en el agua de alimentación mediante un proceso de adsorción en medios filtrantes especializados. Este sistema está compuesto por filtros de acero inoxidable rellenos con un medio adsorbente granular a base de hidróxido férrico (GEH), el cual presenta una alta afinidad química por el arsénico disuelto en el agua.

El principio de funcionamiento se basa en la adsorción superficial, donde el arsénico presente en el agua se adhiere a la superficie del medio adsorbente. Este material posee una elevada área superficial y una alta porosidad, lo que permite capturar y retener el contaminante durante el paso del agua a través del lecho filtrante.

En la planta de tratamiento de agua, el sistema está conformado por tres filtros de adsorción instalados en paralelo, cada uno diseñado para operar a un caudal aproximado de 106 m³/h. El agua de alimentación ingresa al sistema y atraviesa el lecho de medio adsorbente, donde se produce la remoción del arsénico hasta alcanzar concentraciones inferiores a los límites establecidos para agua de proceso o consumo.

Durante la operación del sistema, se realizan procesos periódicos de retrolavado para remover sólidos acumulados y mantener condiciones adecuadas de filtración. El sistema incluye además bombas de alimentación, líneas hidráulicas, válvulas y elementos de control que permiten regular el caudal y las condiciones de operación del proceso.

El correcto funcionamiento del sistema permite garantizar la calidad del agua tratada, logrando concentraciones finales de arsénico inferiores a 10 µg/L, cumpliendo así con los requisitos de calidad establecidos para el proceso productivo.

Función Primaria. La función primaria del sistema de abatimiento de arsénico es remover el arsénico presente en el agua de alimentación mediante procesos de adsorción en un medio filtrante especializado, con el fin de obtener agua tratada que cumpla con los límites de concentración establecidos para su uso en los procesos de la planta.

Función Secundaria. Además de su función principal, el sistema cumple una serie de funciones secundarias necesarias para garantizar su operación segura y eficiente.

- Permitir el paso controlado del flujo de agua a través del lecho filtrante manteniendo las condiciones hidráulicas de diseño.
- Retener y adsorber el arsénico presente en el agua mediante el medio adsorbente granular.
- Permitir la limpieza del medio filtrante mediante procesos de retrolavado para evitar la acumulación de sólidos.
- Mantener la integridad estructural del sistema evitando fugas o pérdidas de agua durante la operación.

- Permitir el control y monitoreo de variables operacionales tales como caudal, presión y calidad del agua tratada.
- Facilitar las operaciones de mantenimiento, reemplazo del medio adsorbente y limpieza de los filtros.

Con el objetivo de identificar de manera estructurada los elementos que componen el abatimiento de arsénico, se realizó un desglose jerárquico del equipo con el mismo criterio jerárquico que se ha utilizado y establecido anteriormente en el documento.

Tabla 20

Desglose jerárquico del sistema de abatimiento de arsénico

CÓDIGO I	NIVEL I	CÓDIGO II	NIVEL II	CÓDIGO III	NIVEL III
1	Sistema de abatimiento de arsénico	1.1	Sistema de filtración	1.1.1	Filtro de adsorción de arsénico
		1.2	Medio adsorbente	1.2.1	Medio adsorbente GEH (hidróxido férrico granular)
		1.3	Sistema de soporte del medio	1.3.1	Grava soportante del lecho filtrante
		1.4	Sistema de alimentación hidráulica	1.4.1	Línea de alimentación de agua a filtros
		1.5	Sistema de bombeo	1.5.1	Bombas de alimentación / booster
		1.6	Sistema de retrolavado	1.6.1	Línea de retrolavado de filtros
		1.7	Sistema de control y monitoreo	1.7.1	Instrumentación de presión y control de caudal

Nota. El desglose jerárquico del sistema de abatimiento de arsénico se define hasta nivel de equipo, considerando los principales subsistemas asociados al proceso de adsorción del arsénico mediante medio adsorbente. Elaboración propia.

Fallas Funcionales. Las fallas funcionales corresponden a situaciones en las cuales el sistema es incapaz de cumplir total o parcialmente las funciones para las cuales fue diseñado. En el sistema de abatimiento de arsénico se identifican las siguientes posibles fallas funcionales:

Tabla 21

Fallas Funcionales Sistema de abatimiento de arsénico

Función	Falla Funcional
Remover arsénico del agua mediante adsorción en el medio filtrante	Incapacidad de remover arsénico del agua
Remover arsénico manteniendo la concentración de salida dentro del rango requerido	Remoción de arsénico fuera del rango de calidad requerido
Permitir el paso del agua a través del sistema de filtración	Incapacidad de permitir el paso del agua
Permitir el flujo de agua dentro de los rangos de caudal y presión de diseño	Operación fuera del rango hidráulico de diseño
Retener el arsénico en el medio adsorbente del filtro	Saturación o pérdida de capacidad de adsorción del medio filtrante
Mantener la integridad estructural del sistema hidráulico	Fuga de agua en el sistema
Permitir la limpieza del lecho filtrante mediante retrolavado	Incapacidad de realizar el retrolavado del sistema
Permitir el monitoreo de las condiciones operacionales del sistema	Incapacidad de monitorear las condiciones operacionales

Hoja AMEF para Abatidores. A partir de la aplicación de la metodología de análisis de modos y efectos de falla (AMEF), cuyo desarrollo completo se presenta en el Anexo E, se identificaron los siguientes modos de falla críticos:

Tabla 22

Modos de Falla Críticos del Sistema de Abatimiento de Arsénico

Modo de Falla	Equipo	NPR
Saturación del medio adsorbente	Medio adsorbente GEH	250
Canalización del flujo en el lecho filtrante	Filtro de adsorción	216
Pérdida prematura de capacidad de adsorción	Medio adsorbente GEH	216
Caudal insuficiente de retrolavado	Sistema de retrolavado	192
Sensor o control fuera de calibración	Instrumentación de control	160

Nota. Modos de falla con mayor NPR identificados para el sistema de abatimiento de arsénico.

El análisis AMEF permitió identificar los modos de falla con mayor criticidad dentro del sistema de abatimiento de arsénico. Los valores más elevados de NPR se asocian principalmente a fallas relacionadas con el desempeño del medio adsorbente y con las condiciones hidráulicas del filtro. Entre los modos de falla más críticos destacan la saturación del medio adsorbente GEH (NPR = 250), la canalización del flujo dentro del lecho filtrante (NPR = 216) y la pérdida prematura de capacidad de adsorción del medio (NPR = 216). Asimismo, se identificaron riesgos relevantes asociados al proceso de retrolavado del filtro y al sistema de monitoreo de las condiciones operacionales. Estos resultados evidencian que los elementos asociados al estado del medio adsorbente, la distribución hidráulica del flujo y el control operativo del sistema constituyen los puntos más críticos para asegurar el correcto funcionamiento del proceso de abatimiento de arsénico.

Ultrafiltración

El sistema de ultrafiltración corresponde a la etapa principal de filtración dentro del proceso de tratamiento de agua de la planta, cuya finalidad es remover sólidos suspendidos, partículas coloidales, bacterias y otros contaminantes presentes en el agua de alimentación mediante el uso de membranas de filtración.

El sistema instalado corresponde a una solución AZUD WATERTech DW U450, configurada en contenedores modulares de ultrafiltración que realizan filtración de hasta 10 micras. La planta está compuesta por cuatro líneas de ultrafiltración instaladas en paralelo, cada una equipada con módulos de membranas de fibra hueca. Cada línea contiene 27 membranas de ultrafiltración, alcanzando un total de 108 membranas en el sistema completo.

Las membranas utilizadas corresponden al modelo Hydracap60 del fabricante NX Filtration, las cuales operan mediante un proceso de filtración por membranas que permite el paso del agua y de especies disueltas de bajo peso molecular, mientras retiene partículas, microorganismos y material coloidal presente en el agua de alimentación.

Durante la operación del sistema, el agua es impulsada hacia los módulos de ultrafiltración mediante bombas de alimentación, produciéndose la separación entre el permeado filtrado y las corrientes de rechazo. Para evitar la acumulación de sólidos sobre la superficie de las membranas, el sistema incorpora ciclos periódicos de limpieza mediante retrolavado (backwash) y procesos de limpieza química tales como CEB (Chemical Enhanced Backwash) y CIP (Clean In Place).

El sistema de ultrafiltración incluye además una serie de equipos auxiliares necesarios para su funcionamiento, tales como bombas de limpieza, soplantes de aire para los ciclos de lavado, válvulas automáticas y manuales para el control hidráulico del sistema, depósitos de almacena-

miento de soluciones químicas, así como instrumentación de monitoreo de presión y temperatura. La operación del sistema se encuentra automatizada mediante un sistema de control PLC y una interfaz de operación HMI que permite supervisar las condiciones de operación y gestionar los ciclos de filtración y limpieza.

Función Primaria. La función primaria del sistema de ultrafiltración es remover partículas, sólidos suspendidos, microorganismos y material coloidal presentes en el agua de alimentación mediante procesos de separación por membranas, con el fin de producir agua tratada que cumpla con los estándares de calidad requeridos para el proceso productivo.

Función Secundaria. Además de su función principal, el sistema de ultrafiltración cumple una serie de funciones secundarias necesarias para garantizar su operación segura y eficiente:

- Permitir el paso del agua a través de las membranas de ultrafiltración manteniendo condiciones adecuadas de presión y caudal durante el proceso de filtración.
- Mantener la integridad estructural de los módulos de membranas evitando fugas o daños que puedan comprometer la calidad del agua filtrada.
- Permitir la limpieza periódica de las membranas mediante ciclos de retrolavado (backwash) utilizando agua filtrada y aire para remover sólidos acumulados en la superficie de las membranas.
- Permitir la limpieza química de las membranas mediante procesos de limpieza CEB y CIP con el fin de recuperar la capacidad de filtración del sistema.
- Permitir el control hidráulico del sistema mediante válvulas automáticas y manuales que

regulan los flujos de alimentación, permeado y drenaje.

- Permitir el monitoreo de variables operacionales tales como presión, temperatura y condiciones del proceso mediante instrumentación instalada en el sistema.
- Permitir la operación automatizada del sistema mediante el sistema de control PLC y la interfaz HMI que gestiona los ciclos de filtración y limpieza.

Con el objetivo de identificar de manera estructurada los elementos que componen el sistema de ultrafiltración, se realizó un desglose jerárquico del equipo críticos en subsistemas asociados al proceso de filtración por membranas y a los sistemas auxiliares necesarios para su operación.

Tabla 23

Desglose jerárquico del sistema de ultrafiltración

CÓDIGO I	NIVEL I	CÓDIGO II	NIVEL II	CÓDIGO III	NIVEL III	CÓDIGO IV	NIVEL IV
I	Sistema de ultrafiltración	1.1	Sistema de filtración por membranas	1.1.1	Membranas de ultrafiltración	1.1.1.1	Fibras de membrana
						1.1.1.2	Sellos del módulo
						1.1.1.3	Colector de permeado
		1.2	Estructura de filtración	1.2.1	Módulos / carcasas de ultrafiltración	1.3.1.1	Motor eléctrico
						1.3.1.2	Sello mecánico
		1.3	Sistema de alimentación hidráulica	1.3.1	Bombas de alimentación UF	1.3.1.3	Impulsor
						1.4.1.1	PLC
						1.4.1.2	Interfaz HMI
		1.4	Sistema de control	1.4.1	Sistema PLC / HMI	1.4.1.3	Módulos de comunicación / señales
						1.5.1.1	Compresor de aire
		1.5	Sistema neumático	1.5.1	Sistema de aire comprimido UF	1.5.1.2	Regulador / acondicionamiento de aire
						1.5.1.3	Líneas neumáticas de accionamiento

Nota. El desglose jerárquico del sistema de ultrafiltración se define hasta nivel IV únicamente en aquellos equipos críticos cuyos subcomponentes presentan modos de falla diferenciables y relevantes para el análisis AMEF. Los módulos de ultrafiltración se mantienen hasta nivel III, dado que sus modos de falla pueden ser analizados adecuadamente a nivel de equipo. Elaboración propia.

Tabla 24

Fallas Funcionales Sistema de ultrafiltración

Función	Falla Funcional
Filtrar el agua mediante membranas de ultrafiltración	Incapacidad de realizar la filtración del agua
Filtrar el agua manteniendo la calidad del permeado dentro del estándar requerido	Producción de agua fuera del estándar de calidad requerido
Permitir el paso del agua a través de las membranas y módulos de ultrafiltración	Incapacidad de permitir el paso del agua a través del sistema
Mantener la integridad física de las membranas de ultrafiltración	Pérdida de integridad de las membranas
Contener el flujo de agua dentro de los módulos/carcasas de ultrafiltración	Fuga de agua en módulos o carcasas
Mantener el caudal y la presión de alimentación requeridos para la operación del sistema	Incapacidad de mantener el caudal o la presión de alimentación requerida
Permitir la operación automatizada y el control de los ciclos de filtración y limpieza	Incapacidad de controlar o automatizar la operación del sistema
Permitir el monitoreo de las variables operacionales del sistema	Incapacidad de monitorear las condiciones operacionales del sistema
Permitir el accionamiento neumático de válvulas durante la operación y los ciclos de limpieza	Incapacidad de operar el sistema neumático de aire comprimido
Permitir la ejecución de los ciclos de retrolavado y limpieza del sistema	Incapacidad de ejecutar los ciclos de limpieza del sistema

Nota. Las fallas funcionales corresponden a la pérdida total o parcial de las funciones requeridas para el sistema de ultrafiltración.

Fallas Funcionales. Cabe destacar que, si bien en el desglose del sistema se bajó hasta nivel 4 en algunos equipos, las fallas funcionales no tienen que bajar al mismo nivel necesariamente ya que se redactan a nivel de función requerida por el sistema/ equipo, en este caso, acorde al sistema de ultrafiltración, por lo que los modos de falla si bajan acorde al desglose realizado.

Tabla 25

Modos de Falla Críticos del Sistema de Ultrafiltración

Modo de Falla	Equipo	NPR
Gripado o daño de rodamientos	Bomba de alimentación UF	300
Regulación inestable de presión	Regulador de aire comprimido UF	192
Colmatación irreversible de fibras	Membranas de ultrafiltración	180
Presión insuficiente de salida	Regulador de aire comprimido UF	180
Fuga o desgaste del sello mecánico	Bomba de alimentación UF	168
Desgaste del impulsor por cavitación	Bomba de alimentación UF	168
Falla intermitente de señales de control	Sistema PLC / comunicación	168
Error en la lógica de control del PLC	Sistema PLC / control	162

Nota. Modos de falla con mayor NPR identificados para el sistema de ultrafiltración.

Hoja AMEF para Sistema de Ultrafiltración (UF). Los modos de falla críticos identificados se concentran principalmente en tres subsistemas del sistema de ultrafiltración: el sistema de filtración (membranas), el sistema hidráulico de alimentación (bombas) y los sistemas auxiliares de

control y aire comprimido. Estos elementos resultan fundamentales para asegurar la continuidad operativa, la calidad del agua tratada y la correcta ejecución de los ciclos de limpieza del sistema. En sí, entre los modos de falla más críticos destacan el daño o gripado de rodamientos en las bombas de alimentación ($NPR = 300$), la regulación inestable de presión en el sistema de aire comprimido ($NPR = 192$) y la colmatación irreversible de las fibras de las membranas de ultrafiltración ($NPR = 180$). Asimismo, se identificaron riesgos relevantes asociados al desgaste de componentes hidráulicos de las bombas, fallas en la transmisión de señales del sistema de control y condiciones inadecuadas de presión en el sistema neumático.

Estos resultados evidencian que los elementos asociados al sistema de filtración, al suministro hidráulico de alimentación y a los sistemas de control y operación del proceso constituyen los puntos más críticos para asegurar la continuidad operativa y la eficiencia del sistema de ultrafiltración. En consecuencia, dichos equipos serán considerados prioritarios en la definición de las tareas de mantenimiento dentro del análisis RCM desarrollado en la fase siguiente de la metodología.

7.4 Selección de Estrategias de Mantenimiento

El desarrollo de esta sección corresponde a los pasos 5 y 6 del RCM clásico. Donde evaluamos estrategias para los modos de falla críticos seleccionados de los análisis AMEF's realizados anteriormente.

Sin una prioridad de modos de falla, sería definir estrategias para cada uno de los modos, lo cual es incorrecto tanto por desperdicio de tiempo y de eficiencia. Una empresa cualquiera nunca resolverá todos sus problemas o abarcará todos los modos posibles de falla, pero sí los más importantes.

Sistema de Inyección de Cloro - Estrategias de Mantenimiento

Una vez identificados los modos de falla críticos mediante el análisis AMEF, se aplicó la lógica de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para seleccionar la política de mantenimiento más adecuada para cada caso.

La selección de tareas se realizó considerando la factibilidad técnica de anticipar la falla, así como las consecuencias asociadas a su ocurrencia. En función de este análisis se definieron tareas predictivas basadas en condición, tareas preventivas cíclicas y acciones de estandarización de procesos cuando no era posible anticipar la falla mediante monitoreo de condición.

Tabla 26

Estrategias de mantenimiento para el sistema de inyección de cloro

Modo de falla	Equipo	RCM	Tipo de tarea	Acción de mantenimiento recomendada
Válvula de inyección bloqueada	Línea de inyección de cloro	Proactiva	Preventiva cíclica	Inspección periódica de la válvula de inyección, limpieza de incrustaciones químicas y verificación del correcto funcionamiento del punto de inyección.
Dosificación incorrecta	Bomba dosificadora de cloro	Proactiva	Predictiva basada en condición	Verificación periódica del caudal de dosificación, calibración de la bomba dosificadora y revisión del estado de diafragma y válvulas internas.
Nivel insuficiente en estanque	Estanque de hipoclorito de sodio	Proactiva	Preventiva cíclica	Monitoreo periódico del nivel de solución de hipoclorito, verificación del sistema de medición de nivel y programación de reposición del reactivo.
Pérdida de cebado	Bomba dosificadora de cloro	Proactiva	Preventiva cíclica	Inspección de líneas de succión, verificación de estanqueidad en conexiones y purga del sistema para asegurar el correcto cebado de la bomba.
Analizador sin señal	Analizador de cloro residual	Proactiva	Preventiva cíclica	Verificación de señal del analizador, limpieza de sensores, calibración periódica del equipo y revisión del sistema de transmisión de datos.

Nota. La tabla resume las estrategias de mantenimiento seleccionadas mediante la lógica de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), asociando cada modo de falla crítico con la política de mantenimiento más adecuada para su gestión dentro del sistema de inyección de cloro.

Sistema de Desinfección Ultravioleta - Estrategias de Mantenimiento

Al igual que para el caso anterior, a partir de nuestra selección de modos críticos, priorizamos las siguientes estrategias de mantenimiento:

Tabla 27*Estrategias de mantenimiento para el sistema de desinfección ultravioleta*

Modo de falla	Equipo	RCM	Tipo de tarea	Acción de mantenimiento recomendada
Incrustación o ensuciamiento del manguito de cuarzo	Manguito de cuarzo	Proactiva	Preventiva cíclica	Inspección periódica del manguito de cuarzo, limpieza del tubo protector y verificación del correcto funcionamiento del sistema de limpieza ultrasónica.
Sensor fuera de calibración	Sensor UV	Proactiva	Preventiva cíclica	Calibración periódica del sensor de intensidad UV, verificación de señal del sensor y limpieza de la superficie del detector para asegurar mediciones correctas.
Pérdida de intensidad de radiación UV	Lámpara UV	Proactiva	Preventiva cíclica	Reemplazo programado de lámparas UV según horas de operación, monitoreo de intensidad UV y verificación del correcto funcionamiento del balasto electrónico.
Acumulación de aire en el reactor	Cámara de desinfección	Proactiva	Preventiva cíclica	Inspección del sistema de purga de aire, verificación de condiciones hidráulicas del reactor y revisión del caudal de operación para evitar acumulación de aire.
Desgaste o ruptura de O-rings	Sellos y O-rings	Proactiva	Preventiva cíclica	Inspección periódica de sellos y juntas, verificación de estanqueidad del reactor y reemplazo programado de O-rings durante mantenciones del equipo.
Falla del sistema de limpieza ultrasónica	Módulo ultrasónico de limpieza	Proactiva	Preventiva cíclica	Prueba funcional del sistema de limpieza ultrasónica, verificación del funcionamiento de la fuente de poder y limpieza del sistema de transmisión ultrasónica.

Nota. La tabla resume las estrategias de mantenimiento seleccionadas mediante la lógica de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), asociando cada modo de falla crítico con la política de mantenimiento más adecuada para su gestión dentro del sistema de desinfección ultravioleta.

Abatidores de Arsénico - Estrategias de Mantenimiento

Según los modos de falla críticos identificados, se seleccionaron las siguientes estrategias:

Tabla 28*Estrategias de mantenimiento para el sistema de abatimiento de arsénico*

Modo de falla	Equipo	RCM	Tipo de tarea	Acción de mantenimiento recomendada
Saturación del medio adsorbente	Medio adsorbente GEH	Proactiva	Basada en condición	Monitoreo periódico de la concentración de arsénico en el agua tratada y programación del reemplazo del medio adsorbente cuando se detecte aproximación al límite de saturación.
Canalización del flujo en el lecho filtrante	Filtro de adsorción	Proactiva	Preventiva cíclica	Verificación periódica de la distribución hidráulica del filtro, inspección del lecho filtrante y ejecución de retrolavados programados para evitar la formación de canales preferenciales.
Pérdida prematura de capacidad de adsorción	Medio adsorbente GEH	Proactiva	Basada en condición	Seguimiento de la eficiencia de remoción de arsénico, control de parámetros operacionales del filtro y evaluación del estado del medio adsorbente mediante análisis de desempeño.
Caudal insuficiente de retrolavado	Sistema de retrolavado	Proactiva	Preventiva cíclica	Verificación periódica del sistema de retrolavado, control del caudal y presión del proceso de limpieza y revisión de válvulas y líneas asociadas al sistema.
Sensor o control fuera de calibración	Instrumentación de control	Proactiva	Preventiva cíclica	Calibración periódica de sensores de presión y caudal, verificación del sistema de control del proceso y revisión de señales de instrumentación asociadas al sistema de filtración.

Nota. La tabla resume las estrategias de mantenimiento seleccionadas mediante la lógica de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), asociando cada modo de falla crítico con la política de mantenimiento más adecuada para su gestión dentro del sistema de abatimiento de arsénico.

Sistema de Ultrafiltración - Estrategias de Mantenimiento

La Tabla 29 a continuación resume las estrategias de mantenimiento seleccionadas para los modos de falla críticos del sistema de ultrafiltración.

Tabla 29*Estrategias de mantenimiento para el sistema de ultrafiltración*

Modo de falla	Equipo	Estrategia RCM	Tipo de tarea	Acción de mantenimiento recomendada
Gripado o daño de rodamientos	Bomba de alimentación UF	Proactiva	Predictiva basada en condición	Monitoreo periódico de vibraciones, control de temperatura de rodamientos y revisión del sistema de lubricación.
Regulación inestable de presión	Regulador de aire comprimido UF	Proactiva	Preventiva cíclica	Inspección periódica del regulador de presión, limpieza de filtros de aire y verificación del ajuste de presión de operación.
Colmatación irreversible de fibras	Membranas de ultrafiltración	Proactiva	Predictiva basada en condición	Monitoreo de presión transmembrana (TMP) y flujo de permeado, programando limpiezas químicas (CIP) cuando se detecten desviaciones operacionales.
Fuga o desgaste del sello mecánico	Bomba de alimentación UF	Proactiva	Preventiva cíclica	Inspección visual periódica del sello mecánico y reemplazo programado según condiciones de operación.
Desgaste del impulsor por cavitación	Bomba de alimentación UF	Proactiva	Predictiva basada en condición	Monitoreo de vibraciones, control del rendimiento hidráulico de la bomba e inspección del impulsor durante paradas programadas.
Falla intermitente de señales de control	Sistema PLC / comunicación	Proactiva	Preventiva cíclica	Revisión periódica de conexiones eléctricas, verificación de módulos de comunicación y pruebas funcionales del sistema de control.
Error en la lógica de control	Sistema PLC	Rediseño / Estandarización	Acción de mejora del sistema	Validación del programa de control, implementación de control de versiones del software y estandarización de los procedimientos de modificación del sistema.

Nota. La tabla resume las estrategias de mantenimiento seleccionadas mediante la lógica de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), asociando cada modo de falla crítico con la política de mantenimiento más adecuada para su gestión dentro del sistema de ultrafiltración.

Síntesis de las estrategias de mantenimiento

A partir del análisis de criticidad, la identificación de funciones del sistema y la evaluación de modos de falla mediante AMEF, se aplicó la lógica de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para definir las políticas de mantenimiento más adecuadas para cada uno de los sistemas analizados en la planta de tratamiento de agua. Esta lógica de decisión establece que las tareas de mantenimiento deben seleccionarse en función de las consecuencias de cada modo de falla y la factibilidad técnica de anticipar su ocurrencia. Siguiendo dicho enfoque, cada modo de falla crítico se evaluó la posibilidad de aplicar: tareas proactivas, actividades preventivas programadas o estandarización de procesos.

Este enfoque permite intervenir los activos antes de que se produzcan fallas funcionales

que puedan afectar la calidad del agua tratada, la continuidad operativa del proceso o la seguridad del sistema.

En los sistemas analizados se identificaron distintos tipos de acciones de mantenimiento, entre las que destacan el monitoreo de variables operacionales críticas, la calibración periódica de instrumentos, la limpieza y verificación de componentes asociados al proceso de tratamiento y el reemplazo programado de elementos con vida útil definida. Asimismo, en aquellos casos donde las fallas no pueden ser anticipadas mediante monitoreo de condición, se definieron tareas preventivas o acciones de estandarización de procesos que permiten reducir la probabilidad de ocurrencia de los modos de falla identificados.

En conjunto, las estrategias propuestas permiten establecer una base estructurada para la gestión del mantenimiento de los sistemas de inyección de cloro, desinfección ultravioleta, abatimiento de arsénico y ultrafiltración, contribuyendo a mejorar la confiabilidad operacional del proceso de tratamiento de agua y asegurando el cumplimiento de los requisitos de calidad establecidos para el sistema.

7.5 Propuestas de Planes de Mantenimiento

Para concluir con el paso 7 del RCM, se debe lograr transformar las estrategias anteriormente identificadas en un plan de mantenimiento aplicable. Esta estructura debe contener tanto la tarea, su frecuencia estimada, equipo al cual se le atribuye, un responsable y su duración estimada.

Sistema de Inyección de Cloro – Plan de mantenimiento

A partir de las estrategias de mantenimiento definidas mediante la lógica RCM, se consolidó un programa de mantenimiento para los equipos del sistema de inyección de cloro. Las tareas

se agrupan según su frecuencia de ejecución con el fin de facilitar su incorporación al plan de mantenimiento de la planta.

Tabla 30

Plan de mantenimiento propuesto para el sistema de inyección de cloro

Frecuencia	Equipo	Actividad de mantenimiento	Especialidad	Duración estimada
Semanal	Bomba dosificadora de cloro	Verificación del caudal de dosificación y revisión de conexiones hidráulicas.	Operación / Mecánico	30 min
Mensual	Línea de inyección de cloro	Inspección y limpieza del punto de inyección para evitar bloqueos o incrustaciones.	Mecánico	1 h
Mensual	Analizador de cloro residual	Limpieza de sensores y verificación de señal de medición.	Instrumentista	1 h
Trimestral	Bomba dosificadora de cloro	Revisión del diafragma, válvulas internas y estado general del sistema de dosificación.	Mecánico	2 h
Semanal	Estanque de hipoclorito	Verificación del nivel de solución y revisión del sistema de medición de nivel.	Operación	15 min

Sistema de Desinfección Ultravioleta – Plan de mantenimiento

Las tareas seleccionadas mediante la lógica RCM se estructuraron en un programa de mantenimiento orientado a preservar la eficiencia del proceso de desinfección UV.

Tabla 31*Plan de mantenimiento propuesto para el sistema de desinfección UV*

Frecuencia	Equipo	Actividad de mantenimiento	Especialidad	Duración estimada
Mensual	Manguito de cuarzo	Inspección visual y limpieza del manguito para evitar incrustaciones.	Operación / Mecánico	1 h
Trimestral	Sensor UV	Calibración del sensor de intensidad UV y verificación de señal.	Instrumentista	1 h
Anual	Lámpara UV	Reemplazo programado de lámparas según horas de operación.	Eléctrico	2 h
Mensual	Sistema de limpieza ultrasónica	Prueba funcional del sistema de limpieza y verificación de la fuente de poder.	Eléctrico	1 h
Trimestral	Sellos y O-rings	Inspección de estanqueidad del reactor y reemplazo preventivo de juntas.	Mecánico	1 h

Sistema de Abatimiento de Arsénico – Plan de mantenimiento

Las tareas definidas se orientan principalmente a asegurar el correcto funcionamiento del lecho adsorbente y mantener la eficiencia del proceso de remoción de arsénico.

Tabla 32*Plan de mantenimiento propuesto para el sistema de abatimiento de arsénico*

Frecuencia	Equipo	Actividad de mantenimiento	Especialidad	Duración estimada
Semanal	Instrumentación de control	Verificación de señales de presión y caudal del sistema de filtración.	Instrumentista	30 min
Mensual	Sistema de retrolavado	Verificación del caudal y presión del proceso de retrolavado.	Operación / Mecánico	1 h
Mensual	Filtro de adsorción	Inspección del estado hidráulico del filtro y revisión de distribución de flujo.	Mecánico	1 h
Trimestral	Medio adsorbente GEH	Análisis de eficiencia de remoción de arsénico en agua tratada.	Laboratorio / Operación	2 h
Según condición	Medio adsorbente GEH	Reemplazo del medio adsorbente cuando se detecte saturación del lecho filtrante.	Mecánico	8 h

Sistema de Ultrafiltración – Plan de mantenimiento

Las tareas propuestas buscan mantener la integridad de las membranas, asegurar la confiabilidad de los sistemas de bombeo y garantizar la correcta operación del sistema de control.

Tabla 33

Plan de mantenimiento propuesto para el sistema de ultrafiltración

Frecuencia	Equipo	Actividad de mantenimiento	Especialidad	Duración estimada
Semanal	Membranas UF	Monitoreo de presión transmembrana (TMP) y flujo de permeado.	Operación	20 min
Mensual	Bomba de alimentación UF	Análisis de vibraciones y revisión del sistema de lubricación.	Mecánico	1 h
Mensual	Sistema de aire comprimido UF	Inspección del regulador de presión y limpieza de filtros de aire.	Mecánico	1 h
Trimestral	Sistema PLC / HMI	Verificación de módulos de comunicación y pruebas funcionales del sistema de control.	Eléctrico / Instrumentista	2 h
Según condición	Membranas UF	Programación de limpieza química (CIP) cuando se detecte incremento de TMP.	Operación	4 h

Los planes de mantenimiento propuestos permiten traducir los resultados del análisis RCM en actividades concretas de gestión del mantenimiento, facilitando su implementación dentro del sistema de mantenimiento de la planta. La definición de frecuencias, especialidades responsables y actividades específicas permite integrar estas tareas dentro de las rutinas operacionales y programas de mantenimiento existentes, contribuyendo a mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas de tratamiento de agua.

Finalmente, es importante aclarar que los planes de mantenimiento propuestos en el presente estudio corresponden a una propuesta técnica basada en los resultados del análisis de criticidad y la aplicación de la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM). La im-

plementación efectiva de estas recomendaciones, así como la asignación de recursos humanos, técnicos y económicos necesarios para su ejecución, queda sujeta a las decisiones de gestión y planificación de la empresa. En este sentido, el presente trabajo busca entregar una base metodológica y técnica formal para su uso tanto en los equipos de la planta de criticidad menores o en otros equipos y sistemas pertenecientes a otras áreas de la planta, como lo son equipos directos de la producción. Este documento entrega un formato que apoya la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento, totalmente escalable para otras partes de la planta.

7.6 Recomendaciones y Trabajos Futuros

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio, se identifican diversas oportunidades de mejora y líneas de desarrollo futuro que permitirían profundizar el análisis realizado y fortalecer la gestión del mantenimiento en los sistemas de tratamiento de agua de la planta.

En primer lugar, se recomienda evaluar la implementación gradual de los planes de mantenimiento propuestos, integrando las tareas definidas mediante la metodología RCM dentro del sistema de gestión de mantenimiento de la planta. Esto permitiría validar en la práctica la efectividad de las estrategias seleccionadas y analizar su impacto en indicadores de confiabilidad, disponibilidad y costos de mantenimiento.

Asimismo, sería recomendable incorporar herramientas de monitoreo predictivo para aquellos equipos identificados como críticos dentro del proceso, tales como bombas de alimentación del sistema de ultrafiltración o sistemas de dosificación química. La implementación de técnicas de mantenimiento basado en condición, como análisis de vibraciones, monitoreo de variables operacionales o análisis de tendencias de proceso, permitiría anticipar fallas potenciales y optimizar la planificación de intervenciones.

Otra línea de desarrollo futuro corresponde a la integración del análisis de confiabilidad con indicadores de gestión del mantenimiento, tales como disponibilidad operacional, tiempo medio entre fallas (MTBF) y tiempo medio de reparación (MTTR). El seguimiento de estos indicadores permitiría evaluar la efectividad de las estrategias implementadas y ajustar los planes de mantenimiento en función del comportamiento real de los equipos.

Además, la actual falta de monitoreo mediante equipos temporizadores industriales, horómetros (que registran horas de funcionamiento/inactividad), ayudan a tener un control directo de dichos indicadores MTBF y MTTR por lo que su incorporación ayuda directamente a establecer cuellos de botella cuando existen detenciones. Esta información justificará fallos y complementará información que ayuden a mejorar los planes de mantenimiento.

También se recomienda profundizar el análisis en sistemas adicionales del proceso de tratamiento de agua que no fueron abordados en el presente estudio, tales como sistemas de almacenamiento, bombeo auxiliar o etapas complementarias del tratamiento. La aplicación de la metodología RCM a estos sistemas permitiría ampliar el enfoque de confiabilidad a nivel de planta completa.

Finalmente, como línea de trabajo futuro, se sugiere desarrollar modelos de análisis de costos asociados a las estrategias de mantenimiento propuestas, con el fin de evaluar el impacto económico de la implementación del enfoque RCM en la gestión del mantenimiento. Este análisis permitiría cuantificar los beneficios potenciales en términos de reducción de fallas, optimización de recursos y mejora en la confiabilidad operacional del sistema.

8 Conclusiones

El presente estudio tuvo como objetivo aplicar la metodología de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para el análisis de los principales sistemas asociados al tratamiento de agua en la planta, con el propósito de identificar modos de falla críticos y proponer estrategias de mantenimiento orientadas a mejorar la confiabilidad operacional del proceso.

A partir del análisis de criticidad desarrollado en la primera etapa del estudio, fue posible priorizar los activos físicos con mayor impacto dentro del sistema de tratamiento de agua, permitiendo enfocar el análisis en los equipos cuya falla podría afectar de manera significativa la calidad del agua tratada, la continuidad operativa del proceso o la seguridad del sistema.

En la fase de análisis funcional y descomposición jerárquica de los sistemas, se identificaron las funciones primarias y secundarias de los principales equipos involucrados en los procesos de inyección de cloro, desinfección ultravioleta, abatimiento de arsénico y ultrafiltración. Este análisis permitió comprender de manera estructurada el funcionamiento de cada sistema y establecer las bases para la identificación de fallas funcionales dentro del proceso de tratamiento de agua.

Posteriormente, mediante la aplicación del Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF), se identificaron los modos de falla potenciales asociados a los equipos analizados, evaluando su criticidad mediante la estimación de severidad, ocurrencia y detectabilidad. Este análisis permitió priorizar aquellos modos de falla con mayor Número de Prioridad de Riesgo (NPR), concentrando el estudio en los eventos que presentan mayor impacto sobre el desempeño de los sistemas.

Entre los modos de falla más relevantes identificados destacan la saturación del medio adsorbente en los abatidores de arsénico, la incrustación del manguito de cuarzo en el sistema de desinfección UV, fallas en la dosificación dentro del sistema de inyección de cloro y fenómenos de

colmatación o deterioro progresivo de membranas en el sistema de ultrafiltración. Estos eventos representan condiciones que pueden afectar directamente la calidad del agua tratada o la continuidad del proceso productivo.

En base a los resultados obtenidos en el análisis AMFE, se aplicó la lógica de decisión del Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM) para seleccionar las estrategias de mantenimiento más adecuadas para cada modo de falla crítico. Las estrategias definidas priorizan la aplicación de tareas proactivas basadas en condición, tales como monitoreo de variables operacionales, análisis de vibraciones, seguimiento de presión transmembrana en membranas de ultrafiltración y calibración periódica de instrumentación de proceso.

Asimismo, se definieron tareas preventivas cíclicas orientadas a mantener la integridad de componentes críticos del sistema, tales como limpieza de manguitos de cuarzo, verificación del sistema de retrolavado de filtros, inspección de sistemas de dosificación química y revisión de sistemas neumáticos asociados al proceso de ultrafiltración.

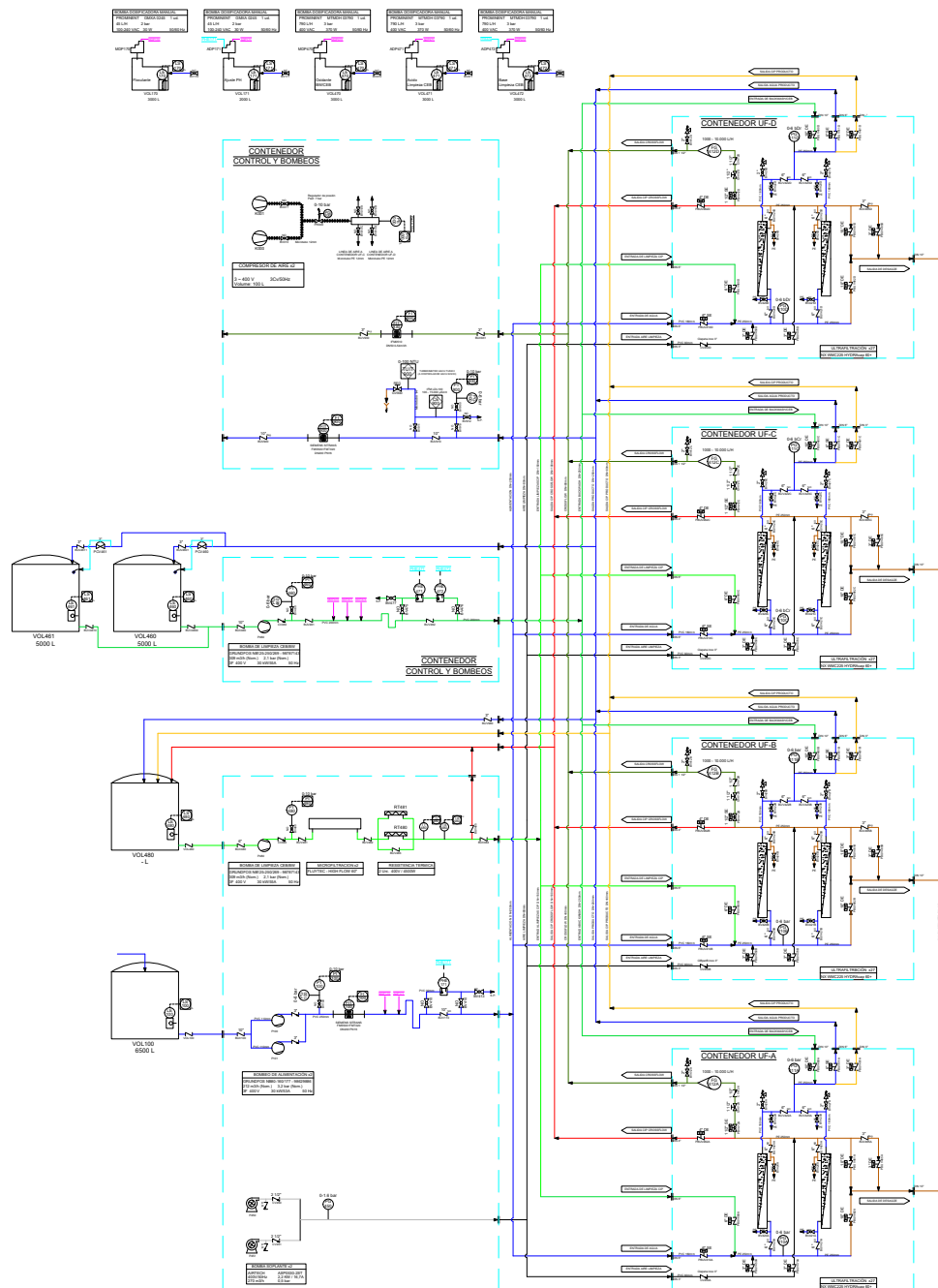
Finalmente, los resultados del análisis permitieron consolidar planes de mantenimiento propuestos para cada uno de los sistemas estudiados, estructurando las tareas de mantenimiento en función de su frecuencia, especialidad responsable y tipo de intervención requerida.

Cabe señalar que las estrategias y planes de mantenimiento presentados corresponden a una propuesta técnica basada en la aplicación de la metodología RCM y en el análisis de los sistemas evaluados. La implementación efectiva de estas recomendaciones dependerá de la planificación interna de la organización y de la disponibilidad de recursos humanos, técnicos y económicos necesarios para su ejecución. No obstante, el estudio entrega una herramienta estructurada que puede apoyar la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento de la planta, contribuyendo a mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas de tratamiento de agua analizados.

Anexo A: Planta Ultrafiltración

Figura 9

Plano Planta Ultrafiltración



Nota. El plano muestra la interconexión de todos los equipos y procesos parte del sistema de Ultrafiltración.

Anexo B: Componentes Ultrafiltración

Figura 10
Equipos de contenedores de ultrafiltración



EQUIPOS CONTENEDOR DE ULTRAFILTRACIÓN (TOTAL 4 UNIDADES)					
P&ID	ITEM	MARCA	MODELO	UDS.	TOTAL UDS. (CONTENEDOR 1-4)
P&V412	VÁLVULA BOLA CON ACTUADOR NEUMÁTICO SIMPLE EFECTO			1,0	4,0
BV420/421/422/423/424/425	VÁLVULA BOLA PE	PRAHER	M1 2VIAS DN50 EPDM PTFE	6,0	24,0
BV412/426/427	VÁLVULA BOLA VENTOSA	FIP		3,0	12,0
P&BV482	VÁLVULA MARIPOSA CON ACTUADOR NEUMÁTICO DOBLE EFECTO	PRAHER	PVC DE 2"	1,0	4,0
P&BV480	VÁLVULA MARIPOSA CON ACTUADOR NEUMÁTICO DOBLE EFECTO	PRAHER	K4 WAFER D110-4"	1,0	4,0
P&BV410/411	VÁLVULA MARIPOSA CON ACTUADOR NEUMÁTICO SIMPLE EFECTO	PRAHER	K4 WAFER D160-6"	2,0	8,0
P&BV460/461/462	VÁLVULA MARIPOSA CON ACTUADOR NEUMÁTICO DOBLE EFECTO	PRAHER	K4 WAFER D225-8"	3,0	12,0
P&BV450/465/470/481	VÁLVULA MARIPOSA CON ACTUADOR NEUMÁTICO DOBLE EFECTO	PRAHER	K4 WAFER D90-3"	4,0	16,0
B&V420/421/422/423/424/425	VÁLVULA MARIPOSA MANUAL	PRAHER	K4 WAFER 3"	6,0	24,0
BUV465	VÁLVULA MARIPOSA MANUAL	PRAHER	K4 WAFER D90-3"	1,0	4,0
CV412	VÁLVULA ANTIRRETORNO EPDM	CEPEX	PVC-U MUELLE Ø50	1,0	4,0
CV450	VÁLVULA ANTIRRETORNO	CEPEX	CLAPETA INOXIDABLE 3"	1,0	4,0
GV412	VÁLVULA COMPUERTA	GENEBRE	V. INOX COMPUERTA 1 1/2" PN16	1,0	4,0
	CONTENEDOR MARÍTIMO	METALPLAK	40 PIES HIGH CUBE	1,0	4,0
PG420/421/422/423	MANÓMETRO	AZUD	1/4" 0-6BARES	4,0	16,0
FG412	ROTÁMETRO	PRAHER	2" 1.000 - 10.000 L/H	1,0	4,0
-	MEMBRANA ULTRAFILTRACIÓN			27,0	108,0
-	ESTRUCTURA INOXIDABLE ULTRAFILTRACIÓN	NX FILTRATION B.V.	WMC225 HYDRACAP60	1,0	4,0
-	BLOQUE DE VÁLVULAS		INOX 316L	1,0	4,0
-	ARMARIO METÁLICO	SMC	SY3000 DE 10 ESTACIONES 5/2	1,0	4,0
		IDE ELECTRIC	600X500X250 PUERTA SIMPLE	1,0	4,0

azud.com

1 / 2

Nota. El documento muestra el listado total de equipos que componen este subproceso de la planta.

Figura 11
Equipos del contenedor de control de ultrafiltración

AZUD

EQUIPOS CONTENEDOR DE CONTROL					
P&ID	ITEM	MARCA	MODELO	UDS.	
P480	BOMBA DE LIMPIEZA CIP/BW	GRUNDFOS	NB125-250/269-98787143	1,0	
P460	BOMBA DE LIMPIEZA CEB/BW	GRUNDFOS	NB125-250/269-98787143	1,0	
P450/451	BOMBA SOPLANTE	AIRTECH	ASC0530-25T751-7 TRIF.	2,0	
PT/P900, PT/P4460, PT/P480, PT/P1100	TRANSMISOR DE PRESIÓN	ENDRESS+HAUSER	PMP51 C-VISOR	4,0	
TT480	TRANSMISOR TEMPERATURA	IFM	TA-100C LER1 3-A-2VDC/US	1,0	
VOL170/171/470/471/472	DEPÓSITO ALMACENAMIENTO QUÍMICOS	TODOGUÍA	3000 L, 5600379818586	5,0	
VOL460/461	DEPÓSITO 5.000 L	-	CON BRIDA SUPERIOR PARA LLENADO D110 mm, 4" BRIDA INFERIOR DE SALIDA D200 mm, 8" 3 BRIDAS SUPERIORES D90 mm, 3"	2,0	
VOL480	DEPÓSITO 6.500 L	-	1 BRIDA SUPERIOR D110 mm 4" 1 BRIDA INFERIOR SALIDA D160 mm, 6"	1,0	
PHE171	SONDA PH	PROMINENT	PHEP112SE RANGO 1/112	1,0	
PHE471/472	SONDA PH	PROMINENT	PHEP112SE RANGO 1/112	2,0	
BUV900/910/100	VÁLVULA MARIPOSA MANUAL	GENEBRE	C/PALANCA 10" METAL	3,0	
BVXXX	VÁLVULA BOLA	FP	PVC 1/2"	30,0	
BUV110	VÁLVULA MARIPOSA MANUAL	GENEBRE	WAFER C/VOLANTE 10" ANSI DISCO INOX	1,0	
VOL100	VÁLVULA MARIPOSA MANUAL	PRAHER	K4 WAFER D90-3"	1,0	
BUV930/931/980	VÁLVULA MARIPOSA MANUAL	FP	WAFER FEOV/LM Ø90	3,0	
BUV4611/4601/465/463	VÁLVULA MARIPOSA MANUAL	FP	WAFER FEOV/LM Ø110	4,0	
VOL480/ BUV480/462/464/	VÁLVULA MARIPOSA MANUAL	FP	WAFER FEOV/LM Ø160	5,0	
BUV4610/4600/460/462	VÁLVULA MARIPOSA MANUAL	FP	WAFER FEOV/LM Ø225	5,0	
CV480	VÁLVULA RETENCIÓN	HIDROTEC	SYSTEM 160-6" AUTOC.VISOR	1,0	
CV450/451	VÁLVULA ANTI-RETORNO	CEPEX	PVC-U MUELLE Ø75 EPDM	2,0	
CV900	VÁLVULA RETENCIÓN	HIDROTEC	SYSTEM 200-7" AUTOC.VISOR	1,0	
CV460	VÁLVULA RETENCIÓN	HIDROTEC	SYSTEM 225 AUTOC.VISOR	1,0	
GV900	VÁLVULA COMPUERTA	GENEBRE	V. INOX COMPUERTA PN16	1,0	
PG450/900	MANÓMETRO 0-16 BAR	SALVADOR ESCODA	GLICERINA ROSCA	2,0	
PG100/460/900	MANÓMETRO 6 BAR	SALVADOR ESCODA	GLICERINA ROSCA	3,0	
TUT900	SENSOR TURBIDEZ LASER	HACH	TUS300 V.EPA	1,0	
PG000	PRESOSTATO	ENDRESS+HAUSER	PTP918 10B	1,0	
K000/K001	COMPRESOR	JAFER	FP-100 3CV 100L	2,0	
FT930	CAUDALIMETRO	SIEMENS	SITRANS FMSS00 DN200 8" 0-5000M3/H	2,0	
FT930	CAUDALIMETRO	IFM	SM0510 4-20mA INOX 316 54 M3/H ROSCADA 2"	1,0	
CE900	SENSOR CONDUCTIVIDAD	IFM	LDL100 100-15000 µS/cm	1,0	
ST480	SENSOR TEMPERATURA	IFM	TK710 M12 DC+ CABLE C	1,0	
-	CARTUCHO MICROFILTRACIÓN 5 MICRON	FLUITEC	PNF-S-HIGH FLOW 60"	2,0	
-	CARCASA MICROFILTRACIÓN	FLUITEC	FTP-68L XS PRFV HIGH FLOW 60"	2,0	
RT480/481	RESISTENCIA DE INMERSIÓN	SALVADOR ESCODA	ED-210 4500W	2,0	
LE170/171/470/471/472	SONDA NIVEL	PROMINENT	PVC REF. 142064	5,0	
MDP470	BOMBA DOSIFICADORA	PROMINENT	MTMDH03790 3BAR, 700L/H 230/400V 50HZ	1,0	
ADP471/472	BOMBA DOSIFICADORA	PROMINENT	SIGMA3 VERSION B CBH40830 100-240V 1040L/H 4BAR	2,0	
MDP170/ADP171	BOMBA DOSIFICADORA	PROMINENT	GMXA 0245 100-230V 2B 45L/H	2,0	
MDP470/ ADP471/472	VÁLVULA INYECCIÓN	PROMINENT	G 1/12 DN25	3,0	
-	CONTROLADOR PARA PH/REDOX O CLORO LIBRE	PROMINENT	DCCAW004PROVIDES 4-20MA 230V 50/60HZ	3,0	
-	ARMARIO METÁLICO	IDE ELECTRIC	2000X1200X500 DOBLE PUERTA	1,0	
-	ARMARIO METÁLICO	IDE ELECTRIC	2000X800X500 PUERTA SIMPLE	1,0	
-	AUTÓMATA, MÓDULO 4E/2S ANALÓGICAS	SIEMENS	6ES7234-4EH32-0XB0	2,0	
-	AUTÓMATA, MÓDULO 8 ENTRADAS ANALÓGICAS	SIEMENS	6ES7231-4EH32-0XB0	1,0	
-	AUTÓMATA, MÓDULO DIGITAL 8E/8S	SIEMENS	6ES7231-1BH32-0XB0	2,0	
-	MAGNETOTÉRMICO 3P	SIEMENS	3VA1392-4EF32-0AA0	1,0	
-	MAGNETOTÉRMICO CURVA D ACCESORIAL	SIEMENS	3SL4269-9	3,0	
-	MAGNETOTÉRMICO 4P	SIEMENS	3VA1392-4AF42-0AA0	1,0	
-	AUTÓMATA 57-1200 CPU 1214C DC/DC	SIEMENS	6ES7214-1AG40-0XB0	1,0	
-	PANEL HMI 12" KTP1200	SIEMENS	6AV2 123-2MB03-0AX0	1,0	
PCV460/461	PULSADOR SETA REARME MANUAL	-	40 MM	2,0	
-	ROUTER	SECOMEA	SITEMANAGER 1539/4G	1,0	
LE100/460/461/480	SONDA NIVEL	PROMINENT	PVC REF. 142064	4,0	
ME100	MEZCLADOR ESTÁTICO 3 ALETAS	-	ZPM DN-300	1,0	
P100	BOMBA DE ALIMENTACIÓN	GRUNDFOS	NBR0-160/177-98629886	2,0	
P101	BOMBA DE ALIMENTACIÓN	GRUNDFOS	NBR0-160/177-98629886	2,0	

azud.com

2 / 2

Nota. El documento muestra el listado total de equipos que componen este subproceso de la planta.



Anexo C: AMEF del Sistema de Inyección de Cloro

Tabla 34*Hoja de trabajo AMEF del sistema de inyección de cloro (Parte 1)*

Código Equipo	Función	Modo de Falla	Efecto de Falla	S	Causa de Falla	O	Control Actual	D	NPR
1.1.1	Almacenar hipoclorito	Fuga en estanque	Derrame de agente químico	8	Deterioro del material del estanque	3	Inspección visual periódica	5	120
		Nivel insuficiente de hipoclorito	Interrupción de la dosificación	8	Falta de reposición del químico control	4	Inspección visual periódica nivel estanque	4	128
		Obstrucción en la salida del estanque	Reducción del flujo hacia la bomba	7	Cristalización o sedimentos	3	No hay	6	126
1.2.1	Dosificar hipoclorito al proceso	Falla de bomba dosificadora	No se inyecta cloro al sistema de tratamiento	9	Falla eléctrica o daño del motor	4	Inspección periódica de bomba	3	108
		Dosificación incorrecta	Cloro residual fuera de rango	8	Descalibración de bomba	5	Verificación operativa del sistema	4	160
		Pérdida de cebado de la bomba	Interrupción del flujo de hipoclorito	8	Entrada de aire en succión	4	Verificación operativa de la bomba	4	128
		Fuga en conexiones de bomba	Derrame de hipoclorito	7	Deterioro de sellos	3	No hay	3	63
		Obstrucción interna	Reducción de caudal de dosificación	8	Cristalización del químico	4	Limpieza preventiva del sistema	4	128
1.3.1	Inyectar cloro al flujo de agua	Obstrucción en línea de inyección	Reducción o interrupción del flujo de cloro	7	Acumulación de sedimentos o cristales	4	Limpieza programada	4	112
		Fuga en la línea de inyección	Derrame de hipoclorito	7	Incrustaciones o corrosión	3	Inspección visual tubería	4	84
		Válvula de inyección bloqueada	No se inyecta cloro al sistema	8	Incrustaciones o corrosión	4	No hay	6	192

Nota. La tabla presenta resultados AMEF para el sistema de inyección de cloro, junto con la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), utilizados para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Elaboración Propia.

Tabla 35*Hoja de trabajo AMEF del sistema de inyección de cloro (Parte 2)*

1.4.1	Medir concentración de cloro residual	Analizador no entrega señal	Imposibilidad de monitorear el cloro residual	8	Falla eléctrica o del sensor	4	Verificación operativa	4	128
		Lectura incorrecta	Dosificación inadecuada	8	Descalibración	5	Calibración periódica del sensor	3	120
		Sensor contaminado	Lecturas erróneas del cloro residual	7	Sedimentos	4	Limpieza del sensor	4	112
		Pérdida de comunicación con sistema de control	Operador no recibe datos	6	Falla de señal o cableado	3	Supervisión sistema de control	5	90

Nota. La tabla presenta resultados AMEF para el sistema de inyección de cloro, junto con la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), utilizados para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Elaboración Propia.



Anexo D: AMEF del Sistema UV

Tabla 36*Hoja de trabajo AMEF del sistema de desinfección ultravioleta UV (Parte 1)*

Código Equipo	Función	Modo de Falla	Efecto de Falla	S	Causa de Falla	O	Control Actual	D	NPR
1.1.1	Contener el agua y permitir la exposición del flujo a la radiación UV	Fuga en la cámara de desinfección	Pérdida de agua y detención del proceso de desinfección	8	Deterioro estructural, corrosión o daño mecánico en la cámara	3	Inspección visual periódica del reactor	4	96
		Acumulación de aire en el reactor	Reducción de la dosis UV efectiva y disminución de la eficiencia de desinfección	7	Ingreso de aire en la línea o purga insuficiente del sistema	4	Sistema de purga y control de operación del caudal	5	140
1.1.2	Permitir la conexión hidráulica entre el reactor y la tubería	Fuga en conexiones sanitarias	Pérdida de agua y riesgo de contaminación del área	6	Aflojamiento de pernos, desgaste de juntas o instalación incorrecta	4	Inspección y mantenimiento preventivo	4	96
1.1.3	Garantizar la estanqueidad del sistema	Desgaste o ruptura de O-rings	Fuga de agua dentro del sistema UV	7	Envejecimiento del material o exposición prolongada a condiciones operacionales	5	Programa de mantenimiento preventivo y reemplazo periódico	4	140
1.2.1	Generar radiación ultravioleta para la desinfección del agua	Pérdida de intensidad de radiación UV	Reducción de la dosis UV y disminución de la eficiencia de desinfección	9	Envejecimiento natural de la lámpara o acumulación de horas de operación	6	Monitoreo mediante sensor de intensidad UV	3	162
		Lámpara UV quemada	Interrupción del proceso de desinfección	10	Fin de vida útil de la lámpara	4	Alarma de lámpara apagada	2	80
		Rotura de lámpara UV	Paro del sistema de desinfección	9	Golpe de ariete o manipulación incorrecta	2	Inspección y alarmas del sistema	4	72

Nota. La tabla presenta resultados AMEF para el sistema de desinfección ultravioleta, junto con la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), utilizados para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Elaboración Propia.

Tabla 37*Hoja de trabajo AMEF del sistema de desinfección ultravioleta UV (Parte 2)*

Código Equipo	Función	Modo de Falla	Efecto de Falla	S	Causa de Falla	O	Control Actual	D	NPR
1.2.2	Proteger la lámpara UV y permitir la transmisión de radiación	Incrustación o ensuciamiento del manguito	Disminución de la transmisión de radiación UV	8	Formación de depósitos minerales o biofilm en la superficie	6	Sistema de limpieza ultrasónica del equipo	4	192
		Rotura del manguito de cuarzo	Fuga de agua y daño de la lámpara	9	Vibración o montaje incorrecto	3	Inspección visual	5	135
1.2.3	Monitorear la intensidad de radiación UV	Sensor UV defectuoso	Lectura incorrecta de intensidad UV	9	Falla electrónica o envejecimiento	3	Autodiagnóstico del sistema	4	108
		Sensor fuera de calibración	Subdosificación UV no detectada	9	Deriva de calibración del sensor	4	Verificación y calibración periódica	5	180
1.3.1	Suministrar energía eléctrica a la lámpara UV	Falla del balasto electrónico	Lámpara UV no enciende o funcionamiento inestable	9	Sobrecarga eléctrica o falla interna del balasto	3	Sistema de monitoreo eléctrico del equipo	4	108
		Cortocircuito en balasto	Paro total del sistema UV	10	Ingreso de humedad o falla interna	2	Gabinete eléctrico sellado	4	80
1.3.2	Transmitir energía eléctrica entre los componentes del sistema	Falla o daño en el cableado eléctrico	Interrupción del suministro eléctrico a los componentes del sistema	8	Deterioro del aislamiento o conexiones defectuosas	3	Inspección eléctrica periódica	5	120
1.4.1	Permitir la operación y supervisión del sistema UV	Falla del módulo de control HMI	Pérdida de capacidad de monitoreo y control del sistema	7	Falla electrónica o error de hardware	3	Sistema de alarmas y monitoreo del equipo	4	84

Nota. La tabla presenta resultados AMEF para el sistema de desinfección ultravioleta, junto con la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), utilizados para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Elaboración Propia.

Tabla 38*Hoja de trabajo AMEF del sistema de desinfección ultravioleta UV (Parte 3)*

Código Equipo	Función	Modo de Falla	Efecto de Falla	S	Causa de Falla	O	Control Actual	D	NPR
1.4.2	Controlar la lógica de operación del sistema UV	Error en software o lógica de control	Operación incorrecta del sistema	9	Error de programación o actualización incorrecta	3	Pruebas funcionales del sistema	5	135
1.4.3	Alertar condiciones anormales de operación	Falla en sistema de alarmas	Operación sin advertencia de fallas	8	Error de software o configuración	3	Pruebas periódicas de alarmas	5	120
1.5.1	Limpiar el manguito de cuarzo para mantener la transmisión UV	Falla del sistema de limpieza ultrasónica	Acumulación de incrustaciones en el manguito de cuarzo	7	Falla del módulo ultrasónico o desgaste del sistema	4	Programa de mantenimiento del sistema de limpieza	5	140
1.5.2	Suministrar energía eléctrica al sistema de limpieza ultrasónica	Falla de la fuente de poder	Sistema de limpieza no opera, acumulación de incrustaciones en el manguito de cuarzo	7	Sobretensión eléctrica o desgaste de componentes electrónicos	3	Protección eléctrica y mantenimiento preventivo	4	84

Nota. La tabla presenta resultados AMEF para el sistema de desinfección ultravioleta, junto con la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), utilizados para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Elaboración Propia.



Anexo E: AMEF del Sistema Abatidor de arsénico

Tabla 39*Hoja de trabajo AMEF del sistema de abatidor de arsénico (Parte 1)*

Código Equipo	Función	Modo de Falla	Efecto de Falla	S	Causa de Falla	O	Control Actual	D	NPR
1.1.1	Contener el lecho adsorbente y permitir el paso del agua	Fuga en carcasa o flange del filtro	Pérdida de agua y disminución del caudal del sistema	7	Deterioro estructural, corrosión o falla en soldadura	3	Inspección visual periódica	4	84
		Canalización del flujo en el lecho filtrante	Reducción del tiempo de contacto y menor remoción de arsénico	9	Distribución hidráulica deficiente o asentamiento del lecho	4	Monitoreo de presión diferencial	6	216
1.2.1	Adsorber arsénico disuelto mediante el medio GEH	Saturación del medio adsorbente	Aumento de arsénico en agua tratada	10	Agotamiento de capacidad de adsorción del medio	5	Monitoreo de arsénico en salida del filtro	5	250
		Pérdida prematura de capacidad de adsorción	Reducción de eficiencia de remoción	9	Interferencia de sílice, fosfato o vanadio	4	Control químico de agua de entrada	6	216
		Arrastre de medio adsorbente durante retrolavado	Disminución de altura del lecho y pérdida de eficiencia	8	Caudal de retrolavado excesivo	3	Inspección visual en descarga de retrolavado	5	120
1.3.1	Soportar el medio adsorbente y distribuir el flujo	Asentamiento irregular de la grava	Distribución desigual del flujo y canalización	7	Instalación incorrecta o vibraciones del sistema	3	Inspección durante mantenimiento	6	126
1.4.1	Conducir agua hacia el filtro con el caudal requerido	Fuga en línea de alimentación	Pérdida de presión y caudal del sistema	7	Falla en uniones o desgaste de tubería	3	Inspección de línea y monitoreo de presión	4	84
		Presencia de aire en la línea	Operación inestable y reducción del caudal efectivo	7	Ingreso de aire o purga insuficiente	4	Purga y control operacional	5	140

Nota. La tabla presenta resultados AMEF para el sistema de abatidor de arsénico, junto con la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), utilizados para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Elaboración Propia.

Tabla 40*Hoja de trabajo AMEF del sistema de abatidor de arsénico (Parte 2)*

Código Equipo	Función	Modo de Falla	Efecto de Falla	S	Causa de Falla	O	Control Actual	D	NPR
1.5.1	Impulsar agua a través del sistema de filtración	Trabajo en seco de la bomba	Daño en bomba y pérdida de caudal	8	Bajo nivel de agua o falla de protección	3	Protección eléctrica y monitoreo de presión	5	120
		Caudal insuficiente de bombeo	Operación fuera de condiciones de diseño	8	Desgaste de bomba o ajuste incorrecto	4	Monitoreo de caudal del sistema	4	128
1.6.1	Permitir limpieza del filtro mediante retrolavado	Caudal insuficiente de retrolavado	Colmatación progresiva del filtro	8	Falla hidráulica o válvulas mal ajustadas	4	Monitoreo de presión diferencial	6	192
		Retrolavado excesivo	Pérdida de medio filtrante	7	Ajuste incorrecto de caudal de retrolavado	3	Supervisión operacional	5	105
1.7.1	Monitorear presión y caudal del sistema	Sensor o control fuera de calibración	Operación fuera de parámetros de diseño	8	Descalibración o falla de instrumentación	4	Verificación y calibración periódica	5	160

Nota. La tabla presenta resultados AMEF para el sistema de abatidor de arsénico, junto con la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), utilizados para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Elaboración Propia.



Anexo F: AMEF del Sistema de Ultrafiltración

Tabla 41*Hoja de trabajo AMEF del sistema de ultrafiltración (Parte 1)*

Código Equipo	Función	Modo de Falla	Efecto de Falla	S	Causa de Falla	O	Control Actual	D	NPR
1.1.1.1	Filtrar el agua mediante membranas de UF	Ensuciamiento de fibras	Disminución de flujo permeado y aumento de presión transmembrana	8	Ensuciamiento por partículas y sólidos suspendidos	8	Monitoreo de presión, turbidez de alimentación y rutina de back-wash	2	128
		Ensuciamiento por limpieza ineficiente	Reducción del rendimiento y necesidad de CIP	8	Limpieza CEB/CIP insuficiente o mal ejecutada	4	Procedimiento de CIP y seguimiento operacional	3	96
		Rotura de fibras	Contaminación del permeado y pérdida de calidad del agua	10	Sobrepresión durante operación o back-wash	3	Monitoreo de presión y calidad del permeado	3	90
		Rotura de fibras por degradación química	Paso de sólidos o microorganismos al permeado	10	Exposición a químicos fuera de especificación	4	Procedimiento de CIP y control de químicos	3	120
		Colmatación irreversible de fibras	Pérdida permanente de capacidad de filtración	9	Fouling prolongado o limpiezas no efectivas	4	Seguimiento de TMP y limpiezas periódicas	5	180
1.1.1.2	Mantener la estanqueidad del módulo	Falla de sellos del módulo	Mezcla interna de corrientes y pérdida de integridad	9	Sobrepresión o envejecimiento del sello	3	Monitoreo de presión y calidad del permeado	4	108
		Degradación química del sello	Falla del sellado y contaminación del permeado	9	Químicos incompatibles o fuera de rango	3	Procedimiento de CIP e inspección de mantención	4	108
1.1.1.3	Colectar el permeado filtrado	Obstrucción del colector de permeado	Reducción de flujo de permeado y aumento de presión	8	Incrustaciones o crecimiento biológico	4	Monitoreo de presión y procedimientos de limpieza	4	128

Nota. La tabla presenta resultados AMEF para el sistema de ultrafiltración, junto con la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), utilizados para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Elaboración Propia.

Tabla 42*Hoja de trabajo AMEF del sistema de ultrafiltración (Parte 2)*

Código Equipo	Función	Modo de Falla	Efecto de Falla	S	Causa de Falla	O	Control Actual	D	NPR
1.2.1	Contener el flujo y proteger el sistema de filtración	Fuga en conexión del colector	Pérdida de permeado y menor eficiencia del sistema	7	Montaje incorrecto o mala conexión	3	Inspección visual post montaje	3	63
		Fisura o grieta en carcasa	Fuga de agua al exterior y detención de línea	10	Sobrepresión o golpe de ariete	3	Transmisor de presión y válvulas de alivio	2	60
		Fisura por impacto mecánico	Fuga de agua y pérdida de presión	10	Golpe o mala maniobra en mantención	2	Procedimientos de trabajo e inspección visual	6	120
		Degradación química de carcasa	Fuga y detención del sistema	10	Exposición a químicos CIP fuera de especificación	4	Monitoreo de temperatura y dosificación química	4	160
1.3.1.1	Convertir energía eléctrica en energía mecánica	Fuga en uniones de carcasa	Pérdida de agua y de presión	7	Mal montaje o fatiga en conexiones	4	Inspección visual y prueba de estanqueidad	3	84
		Cortocircuito o sobrecarga del motor	Detención de la bomba y parada de la línea UF	10	Humedad en bobinado o fatiga del aislamiento	4	Guardamotor	3	120
		No arranca	No hay flujo de alimentación y detención de UF	10	Falla de suministro eléctrico	3	Mantenimiento preventivo de tableros	2	60
1.3.1.2	Mantener la estanqueidad de la bomba	Fuga o goteo excesivo del sello mecánico	Pérdida de agua y riesgo de daño progresivo de la bomba	8	Desgaste normal o fin de vida útil	7	Inspección visual y reemplazo preventivo	3	168
		Rotura del sello mecánico	Fuga masiva y parada inmediata	10	Falla de succión o trabajo en seco	3	Sensor de nivel / protección de succión	2	60

Nota. La tabla presenta resultados AMEF para el sistema de ultrafiltración, junto con la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), utilizados para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Elaboración Propia.

Tabla 43*Hoja de trabajo AMEF del sistema de ultrafiltración (Parte 3)*

Código Equipo	Función	Modo de Falla	Efecto de Falla	S	Causa de Falla	O	Control Actual	D	NPR
1.3.1.3	Generar presión y flujo de alimentación	Obstrucción del impulsor	Caída drástica de flujo y pérdida de capacidad de UF	9	Ingreso de sólidos o partículas	5	Monitoreo de presión de descarga	2	90
		Desgaste del impulsor por erosión/cavitación	Pérdida gradual de eficiencia y bajo caudal	7	Operación fuera del punto óptimo o baja presión de succión	6	Monitoreo de presión de succión y vibraciones	4	168
		Gripado / daño de rodamientos	Vibración excesiva y falla catastrófica de la bomba	10	Lubricación deficiente o desalineación	5	Plan de lubricación y análisis de vibraciones	6	300
		Rotura del eje por fatiga	Pérdida total de bombeo	10	Desalineación severa bomba-motor	3	Alineación y monitoreo vibracional	5	150
1.4.1.1	Gestionar la lógica automática del sistema	Falla del PLC	Pérdida de control automático y detención del sistema UF	9	Falla electrónica o sobrecarga	3	Alarmas del sistema y respaldo eléctrico	4	108
		Error en la lógica de control del PLC	Secuencias incorrectas de filtración, backwash o CIP	9	Error de programación o modificación incorrecta de parámetros	3	Verificación de programación y pruebas funcionales	6	162
		Pérdida de alimentación eléctrica del PLC	Reinicio o parada no programada del sistema	8	Falla de suministro eléctrico o protección eléctrica	3	Respaldo eléctrico y monitoreo de alimentación	4	96
1.4.1.2	Permitir supervisión local del sistema	Falla del HMI	Pérdida de visualización y dificultad para operar UF	7	Daño de pantalla o error de interfaz	3	Supervisión del panel y pruebas funcionales	4	84

Nota. La tabla presenta resultados AMEF para el sistema de ultrafiltración, junto con la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), utilizados para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Elaboración Propia.

Tabla 44*Hoja de trabajo AMEF del sistema de ultrafiltración (Parte 4)*

Código Equipo	Función	Modo de Falla	Efecto de Falla	S	Causa de Falla	O	Control Actual	D	NPR
1.4.1.3	Transmitir señales entre sensores y actuadores	Falla de comunicación entre HMI y PLC	Visualización errónea o no actualizada del estado del sistema	8	Falla de red, cableado o configuración de comunicación	4	Diagnóstico de comunicaciones y revisión de alarmas	5	160
		Ingreso incorrecto de parámetros o comandos desde HMI	Operación errónea de setpoints o secuencias de limpieza	8	Error de configuración, interfaz defectuosa o intervención incorrecta	3	Validación de parámetros y revisión operativa	6	144
		Pérdida de comunicación de módulos/señales	Pérdida parcial de automatización y errores de operación	8	Falla de comunicación, cableado o módulo I/O	4	Diagnóstico del sistema y revisión de alarmas	5	160
		Lectura incorrecta de señales de proceso	Control inadecuado de bombas, válvulas o limpietas	8	Descalibración, ruido eléctrico o falla de entrada analógica	4	Calibración y verificación de señales	5	160
		Falla intermitente de señal	Operación errática del sistema y generación de alarmas intermitentes	7	Falsos contactos, interferencia eléctrica o conexión defectuosa	4	Inspección eléctrica y diagnóstico de fallas	6	168
1.5.1.1	Suministrar aire comprimido al sistema neumático	Falla del compresor	Imposibilidad de operar válvulas neumáticas y ejecutar backwash	10	Falla mecánica o eléctrica	4	Monitoreo de presión y mantenimiento preventivo	4	160
		Bajo rendimiento del compresor	Llenado lento del sistema y ciclos de limpieza prolongados	7	Desgaste de anillos o válvulas del pistón	5	Mantenimiento preventivo y revisión del cabezal	6	210

Nota. La tabla presenta resultados AMEF para el sistema de ultrafiltración, junto con la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), utilizados para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Elaboración Propia.

Tabla 45*Hoja de trabajo AMEF del sistema de ultrafiltración (Parte 5)*

Código Equipo	Función	Modo de Falla	Efecto de Falla	S	Causa de Falla	O	Control Actual	D	NPR
1.5.1.2	Regular y acondicionar la presión de aire para operación neumática	Presión insuficiente de salida	Válvulas neumáticas no operan correctamente o no completan su maniobra	9	Mala regulación, fuga o falla del regulador	4	Inspección de presión y ajuste periódico	5	180
		Presión excesiva de salida	Operación brusca de válvulas y esfuerzo anormal sobre actuadores neumáticos	8	Falla del regulador o ajuste incorrecto	3	Verificación de presión de trabajo	6	144
		Regulación inestable de presión	Maniobras erráticas o inconsistentes de válvulas automáticas	8	Desgaste interno, suciedad o falla mecánica del regulador	4	Monitoreo de presión e inspección funcional	6	192
1.5.1.3	Distribuir aire comprimido hacia actuadores	Fuga en líneas neumáticas	Pérdida de presión y falla de accionamiento de válvulas	8	Deterioro de mangueras o conexiones	4	Inspección visual y monitoreo de presión	5	160
		Obstrucción en líneas neumáticas	Respuesta lenta o incompleta de válvulas automáticas	7	Humedad o partículas en la línea	3	Mantenimiento preventivo del sistema neumático	6	126

Nota. La tabla presenta resultados AMEF para el sistema de ultrafiltración, junto con la evaluación de Severidad (S), Ocurrencia (O) y Detectabilidad (D), utilizados para el cálculo del Número de Prioridad de Riesgo (NPR). Elaboración Propia.

Referencias

Arata F. (2005). *Manual de gestión de activos y mantenimiento*. RIL editores.

Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad (2025). Redefiniendo la oee para la era moderna.

Consultado el 18 de octubre de 2025.

Disin S.A. (2021). ¿qué es una planta de tratamiento de agua y para qué se necesita? Consultado el 26 de noviembre de 2025.

Enciclopedia Humanidades (n.d.). Six sigma. Consultado el 1 de noviembre de 2025.

International Organization for Standardization (2014a). Asset management — overview, principles and terminology.

International Organization for Standardization (2014b). Iso 55001:2014 asset management — management systems — requirements.

International Organization for Standardization (2018). Iso 55002:2018 asset management — guidelines for the application of iso 55001.

Lean Manufacturing¹⁰ (n.d.). Tpm: Mantenimiento productivo total. Consultado el 1 de noviembre de 2025.

Moubray J. (1997). *RCM II: Reliability-Centered Maintenance*. Industrial Press, 2 edición.

SAE International (2002). Sae j1011: Evaluation criteria for reliability-centered maintenance (rcm) processes.

SafetyCulture Content Team (2024). Mantenimiento proactivo. Consultado el 24 de noviembre de 2025.

Simpliroute (2025). Mtr y mtbf: Qué son y cómo calcularlos. Consultado el 18 de octubre de 2025.

Sistemas OEE (2025). Oee: Guía completa y definitiva del indicador industrial. Consultado el 9 de agosto de 2025.

Tes Nehuén (2024). Confiabilidad - qué es, definición y concepto. Consultado el 18 de octubre de 2025.

Vargas Crisóstomo E. L. y Camero Jiménez J. W. (2021). Aplicación del lean manufacturing (5s y kaizen) para el incremento de la productividad en el área de producción de adhesivos acuosos. *Indata*.

Vinodh S. y Joy D. (2011). Structural equation modelling of lean manufacturing practices. *International Journal of Production Research*, 50(6):1598–1607.

Womack J. P. y Jones D. T. (1996). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. Simon & Schuster.