



DEPARTAMENTO DE  
**INGENIERIA COMERCIAL**  
UNIVERSIDAD TECNICA  
FEDERICO SANTA MARIA

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERIO SANTA MARÍA**

**Departamento de Ingeniería Comercial**

**MBA, Magíster en Gestión Empresarial**

# **MODELO DE DESEMPEÑO OPERACIONAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN LA INDUSTRIA MINERA DE CHILE.**

Tesina de Grado presentada por

**CÉSAR ALEJANDRO DÍAZ MOROSO**

Como requisito para optar al grado de

**MBA, Magíster en Gestión Empresarial**

Guía de Tesina Mg. José Andías Pantoja

Agosto 2025



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título;  Tesis de Postgrado;

**Título del trabajo:** MODELO DE DESEMPEÑO OPERACIONAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN LA INDUSTRIA MINERA DE CHILE

**Nombre del candidato(a):** César Alejandro Díaz Moroso

**Carrera / Grado:** MBA, Magister en Gestión Empresarial

**Campus:** Santiago Vitacura ; **Departamento:** Ingeniería Comercial

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, José Luis Andías, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

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

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

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

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

### 4.- FIRMAS

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

Fecha: 29/07/2025

; Firma:

**Estudiante o Candidato(a):**

Fecha: 29/07/2025

; 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.*

**TITULO DE TESINA:**                    **“MODELO DE DESEMPEÑO OPERACIONAL PARA EL  
TRATAMIENTO DE AGUA DE MAR EN LA INDUSTRIA MINERA DE CHILE”**

**AUTOR:**                               **CÉSAR ALEJANDRO DÍAZ MOROSO**

**TRABAJO DE TESINA,** presentando en cumplimiento parcial de los requisitos para el Grado de MBA, Magíster en Gestión Empresarial de la Universidad Técnica Federico Santa María.

**OBSERVACIONES:** \_\_\_\_\_

**COMISIÓN DE TESINA:**

- Mg. José Luis Andías P.
- Dr. Patricio Mansilla.
- Dr. Lionel Valenzuela O.

Santiago, Agosto 2025

Todo el contenido, análisis, conclusiones y opiniones vertidas en este estudio son de mi exclusiva responsabilidad.

Nombre: CÉSAR ALEJANDRO DÍAZ MOROSO.

Fecha: DÍA DEL EXAMÉN DE GRADO.

# INDICE

RESUMEN EJECUTIVO.....	8
ABSTRACT.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
1.- DEFINICIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE TEMA .....	11
1.1 Justificación del tema.....	11
1.2 Definición del tema.....	11
2.- ALCANCE Y METODOLOGÍA.....	12
2.1 Alcance.....	12
2.2 metodología de trabajo.....	13
3.- DEFINICIÓN DE OBJETIVOS .....	13
3.1 Objetivo Principal.....	13
3.2 Objetivos Específicos.....	13
4.- MARCO TEÓRICO .....	14
4.1 Plantas de tratamiento de agua de mar en la industria minera de Chile.....	14
4.1.1 Procesos de desalinización del agua.....	15
4.1.2 Proyección de uso de agua de mar en la industria minera de Chile.....	16
4.1.3 Proceso Minero de la industria del cobre .....	18
4.1.4 Proceso de una Planta de tratamiento de agua de mar promedio en la industria minera de Chile.....	21
4.2 Cálculo del OEE: Desempeño operacional.....	25
4.3 Definición de indicadores de eficiencia operacional .....	29
4.4 El modelo de Cuadro de Mando Integral (CMI).....	32
4.5 Indicadores Claves en la Gestión de Activos.....	33
4.5.1 Indicadores MTTR y MTBF en la Gestión de Activos.....	33
4.5.2 Disponibilidad Operacional .....	35
5.- APORTE AL CONOCIMIENTO .....	36
5.1 Definición de indicadores de eficiencia operacional adaptados para el tratamiento de agua de mar.....	37
5.2. Definición de Cuadro de mando integral de indicadores .....	44
5.3 Definición de metas de los indicadores de eficiencia .....	45
5.3.1 Justificación del Cálculo de Metas Referenciales y Frecuencia de Medición .....	48
Tiempo promedio de atención ante eventos críticos .....	53

5.4 Gestión de la eficiencia operacional.....	55
5.4.1 Incorporación del OEE Ajustado (OEE-NA) como Indicador Principal.....	59
5.4.2 Aplicación de la metodología de gestión del desempeño para la mitigación de fallas ...	60
5.4.3 Herramientas para identificación de brechas sobre fallas .....	62
5.4.3.1 Gráfico de Pareto .....	63
5.4.3.2 Gráfico de Jack Knife .....	64
6.- CONCLUSIONES.....	66
7.- BIBLIOGRAFIA.....	67
8.- ANEXO.....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1.- construcción de planta desaladora de Compañía Minera Teck Quebrada Blanca .....	10
Ilustración 2.-planta coloso Minera Escondida Ltda.BHP instituto de ingenieros Ilustración 3de minas de chile.....	15
Ilustración 4.- Gráfico fuente por Deypp, Cochilco 2020. ....	18
Ilustración 5.- fuente por Deypp, Cochilco 2020. ....	19
Ilustración 6.- Gráfico fuente por Deypp, Cochilco 2020. ....	20
Ilustración 7.- Diagrama de flujo planta de tratamiento de agua de mar para mineras. Fuente: Elaboración propia .....	21
Ilustración 8.- Presentación OEE Eficiencia General de los Equipos General, Elaboración propia .....	28
Ilustración 9.- Presentación OEE con tiempo de carga, operación, neto y útil, Elaboración propia. ....	31
Ilustración 10.- Presentación El modelo desarrollado por Kaplan y Norton.....	32
Ilustración 11.- Presentación del OEE general.....	37
Ilustración 12.- Grafico del Modelo para el grafico de Pareto .....	63
Ilustración 13.- Grafico Modelo de grafico de JackKnife.....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- indicador, objetivo y definición del tiempo de carga.....	38
Tabla 2.- indicador, objetivo y definición del tiempo de operación.....	39
Tabla 3.- indicador, objetivo y definición del tiempo neto. ....	41
Tabla 4.- indicador, objetivo y definición del tiempo agregando valor.....	43
Tabla 5.- cuadro de mando de indicadores.....	45
Tabla 6.- metas referenciales y frecuencias de medición asociadas a los indicadores estratégicos del CMI. ....	47
Tabla 7.- costos asociados a m <sup>3</sup> rechazados por fuera de especificación. ....	48
Tabla 8.- Costos de producción tratamiento de agua de mar. ....	49
Tabla 9.- Gestión de eficiencia operacional. ....	57
Tabla 10.- Guía práctica para visualizar el estado actual del desempeño operacional. ....	58
Tabla 11.- modelo ilustrativo para la gestión de los procesos internos.....	60

## RESUMEN EJECUTIVO.

La presente tesina desarrolla una propuesta metodológica orientada a la gestión de la eficiencia operacional en plantas de tratamiento de agua de mar mediante ósmosis inversa, específicamente en el contexto de la industria minera chilena. La creciente dependencia del recurso hídrico en los procesos mineros ha incrementado la relevancia estratégica de las plantas desaladoras, convirtiéndolas en instalaciones críticas cuyo rendimiento técnico impacta directamente en la continuidad productiva y en la sostenibilidad de las operaciones. Frente a este escenario, se hace necesario contar con una herramienta que permita evaluar objetivamente el desempeño técnico-operacional, identificar desviaciones y priorizar acciones de mejora con base en información trazable y cuantificable.

Este estudio propone un modelo estructurado en torno al indicador OEE (Overall Equipment Effectiveness), reconocido ampliamente por su capacidad de integrar tres dimensiones esenciales: disponibilidad, rendimiento y calidad. A partir de este marco, se diseñan e implementan indicadores clave de desempeño (KPI) adaptados al proceso específico del tratamiento de agua de mar, los cuales incluyen además métricas como el MTBF (Mean Time Between Failures), MTTR (Mean Time To Repair), porcentaje de agua fuera de especificación, y tiempos promedio de atención ante fallas críticas. Estos KPI son organizados bajo la perspectiva de procesos internos del Cuadro de Mando Integral (CMI), lo que permite alinear el desempeño técnico con los objetivos estratégicos de eficiencia y continuidad operacional.

El análisis de brechas operacionales se apoya en información levantada desde registros reales de operación y mantenimiento de la industria, considerando variables como caudal, presión, tiempos netos de operación y respuesta ante contingencias. Con base en estos datos, se establecen metas referenciales definidas bajo criterios estadísticos y lo que permite diferenciar metas reales y con desviaciones aceptables, evitando juicios arbitrarios y ajustando las expectativas a las capacidades reales de cada instalación.

La propuesta metodológica incluye un conjunto de acciones correctivas y preventivas aplicables a distintos niveles de la operación: estandarización de procedimientos técnicos, gestión del mantenimiento, control de fallas, disponibilidad de repuestos críticos, y trazabilidad de intervenciones. Estas medidas permiten abordar de forma sistémica los factores que afectan el OEE y los indicadores de confiabilidad, promoviendo una cultura de mejora continua y de gestión proactiva del desempeño.

Complementariamente, se utilizan herramientas visuales como el gráfico de Pareto, el Jack Knife para caracterizar las principales fuentes de pérdida, identificar cuellos de botella y priorizar las acciones de intervención. Estas herramientas facilitan el análisis técnico de fallas, la toma de decisiones basada en evidencia, y la formulación de planes de mejora estructurados y sostenibles en el tiempo.

En síntesis, esta tesina representa un aporte técnico y metodológico para la industria minera chilena, ofreciendo una propuesta concreta y replicable para optimizar el desempeño de las plantas desaladoras. Su aplicación práctica permite fortalecer la gestión operacional, mejorar el uso de los recursos técnicos y humanos, y contribuir al cumplimiento de metas estratégicas en términos de productividad, eficiencia y sustentabilidad.

## ABSTRACT

This thesis proposes a methodological framework for managing operational efficiency in seawater treatment plants using reverse osmosis, focusing on the Chilean mining industry. Given the increasing dependence on desalinated water for productive continuity, the study emphasizes the need for structured tools to monitor performance, identify losses, and guide continuous improvement.

The proposed model is based on the Overall Equipment Effectiveness (OEE) indicator, complemented by a tailored set of Key Performance Indicators (KPIs) such as MTBF, MTTR, off-spec water percentage, and response time to failures. These are aligned under the Internal Processes perspective of the Balanced Scorecard (BSC) to ensure strategic coherence.

Operational data from real facilities was analyzed to define statistically grounded performance targets and identify gaps in key areas like maintenance management, failure control, and procedural standardization. Visual tools such as Pareto and Jack Knife charts are used to prioritize corrective actions and support decision-making based on evidence.

The proposed approach offers a replicable and practical contribution to improving technical reliability and efficiency in critical infrastructure, supporting sustainability and productivity objectives in mining operations.

## INTRODUCCIÓN

En la industria minera chilena, el uso de plantas de tratamiento de agua de mar se ha consolidado como una estrategia clave para enfrentar la escasez hídrica. Sin embargo, aún persisten brechas significativas en la gestión del desempeño de estas instalaciones, especialmente en lo relativo a la estandarización de indicadores, la medición objetiva de eficiencia y la implementación de metodologías de mejora continua fundamentadas en evidencia.

Según el más reciente informe «Proyección de Consumo de Agua en la Minería del Cobre 2024-2034» de Cochilco (junio 2025), se anticipa que para 2034 el uso de agua de mar aumentará un 113 %, alcanzando los 14,5 m<sup>3</sup>/s, y llegará a abastecer aproximadamente el 66 % del total de agua utilizada en la minería del cobre. En contraste, el consumo de agua continental disminuirá un 36,7 % respecto a 2023. Esto confirma una transición estratégica hacia fuentes hídricas no convencionales.

Este escenario evidencia la urgencia de contar con un modelo de gestión del desempeño operacional que sea específico, estructurado y replicable para las plantas desaladoras. La diversidad de metodologías utilizadas actualmente impide una comparación rigurosa entre unidades y dificulta la identificación precisa de las ineficiencias operacionales. A diferencia de otros sectores industriales donde los indicadores están consolidados, en la desalación marina minera aún no existen estándares compartidos.

Por ello, la presente tesina propone un marco que integra indicadores clave como OEE e indicadores de mantenimiento, complementados con herramientas de análisis de brechas y visualización, bajo un enfoque adaptable a diferentes realidades operativas. Este modelo busca no solo facilitar la toma de decisiones basadas en datos confiables, sino también optimizar la disponibilidad de activos y promover una cultura de eficiencia sustentable alineada con los objetivos estratégicos de continuidad, productividad y sostenibilidad de la industria minera chilena.



*Ilustración 1.- construcción de planta desaladora de Compañía Minera Teck Quebrada Blanca*

## **1.- DEFINICIÓN Y JUSTIFICACIÓN DE TEMA**

### **1.1 Justificación del tema**

En la industria minera chilena, el uso de plantas de tratamiento de agua de mar mediante ósmosis inversa se ha consolidado como una solución clave para asegurar la continuidad operacional frente a la escasez hídrica. Sin embargo, la gestión del desempeño de estas instalaciones aún presenta importantes desafíos, especialmente en lo relativo a la estandarización de indicadores, la medición objetiva de la eficiencia y la implementación de metodologías que permitan una mejora continua basada en evidencia.

Actualmente, existe una alta variedad en la forma en que distintas compañías mineras aplican herramientas de gestión operacional. Esta diversidad metodológica, unida a la falta de criterios unificados, dificulta la trazabilidad de las pérdidas productivas y limita la capacidad de comparar el desempeño entre instalaciones similares. A diferencia de otros procesos industriales donde los indicadores de eficiencia están ampliamente consolidados, las plantas desaladoras carecen de un marco operativo común que permita evaluar con precisión su rendimiento técnico y estratégico.

En este contexto, la presente tesina se justifica por la necesidad de desarrollar una metodología específica, estructurada y replicable para gestionar el desempeño operacional en plantas de tratamiento de agua de mar en minería. Esta metodología busca integrar indicadores clave como el OEE, MTBF y MTTR, con herramientas de análisis y visualización de brechas, en un enfoque adaptable a diferentes realidades operativas. Su finalidad es facilitar la toma de decisiones basadas en datos confiables, optimizar la disponibilidad de los activos, y promover una cultura de eficiencia sustentable dentro del marco estratégico de las organizaciones.

### **1.2 Definición del tema.**

El tema central de esta tesina es el diseño y propuesta de un modelo de gestión del desempeño operacional aplicado al proceso de tratamiento de agua de mar en la industria minera chilena. Este modelo busca incrementar la productividad mediante la identificación de pérdidas críticas, la definición de indicadores clave de desempeño y la incorporación de variables de eficiencia operacional. El enfoque considera tanto los aspectos técnicos del proceso como la gestión integral del mantenimiento, asegurando que las métricas propuestas sean coherentes con las particularidades de cada operación minera.

## 2.- ALCANCE Y METODOLIGÍA

### 2.1 Alcance

Esta tesina se enfoca en el diseño e implementación de un modelo metodológico para la gestión del desempeño operacional en plantas de tratamiento de agua de mar mediante ósmosis inversa, con aplicación específica en el contexto de la industria minera chilena. Su alcance considera el análisis de desempeño técnico y estratégico desde una perspectiva integrada, abarcando indicadores claves de eficiencia, confiabilidad y respuesta operativa.

El estudio aborda el desempeño mediante indicadores operacionales como el OEE (Overall Equipment Effectiveness), la disponibilidad técnica, el MTBF (Mean Time Between Failures) y el MTTR (Mean Time To Repair), que permiten evaluar la efectividad de los activos críticos, los tiempos improductivos y la capacidad de respuesta frente a fallas. Estos indicadores son integrados en un Cuadro de Mando Integral (CMI) adaptado al entorno industrial minero, facilitando la trazabilidad entre el comportamiento técnico y los objetivos estratégicos.

Asimismo, el modelo incorpora herramientas para la identificación de brechas operacionales, el establecimiento de metas cuantificables, y la formulación de planes de acción correctiva o preventiva, todo basado en evidencia empírica y datos operativos. De este modo, el alcance de la tesina no solo propone una medición más rigurosa del desempeño, sino también una estrategia estructurada para su mejora continua, orientada a aumentar la disponibilidad, confiabilidad y eficiencia de las plantas desaladoras mineras.

## **2.2 metodología de trabajo.**

Esta tesina tendrá una estructura que va a seguir las siguientes fases:

- a) Definición de objetivos
- b) Marco teórico
- c) Aporte al conocimiento
- d) Conclusiones

## **3.- DEFINICIÓN DE OBJETIVOS**

Esta primera etapa contempla la formulación de los objetivos principales y específicos que guiarán el desarrollo de la tesina con el fin de entregar un modelo de desempeño.

### **3.1 Objetivo Principal**

Diseñar y construir un modelo de desempeño operacional que permita aumentar la productividad en las plantas de tratamiento de agua de mar en la industria minera chilena. El modelo estará orientado a mejorar la eficiencia de los procesos mediante la identificación de las principales fuentes de pérdida, así como la visualización de oportunidades de mejora que impacten de forma directa en los resultados operacionales.

### **3.2 Objetivos Específicos**

1. Definir de indicadores claves para la eficiencia operacional para el tratamiento de agua de mar.
2. Detallar y aplicar indicadores operacionales en procesos de tratamiento continuo de agua de mar.
3. Establecer definiciones de metas cuantificables asociadas a los indicadores de eficiencia.
4. Formular una estrategia de eficiencia operacional basada en mantenimiento y análisis de brechas.

## 4.- MARCO TEÓRICO

En este marco teórico se presentarán los conceptos de plantas de tratamientos de agua de mar y las metodologías para realizar una planificación estratégica que para esta tesina serán las siguientes y se deben exponer:

1. Plantas de tratamiento de agua de mar en la industria minera de Chile.
2. Cálculo del OEE para el desempeño operacional.
3. Principales indicadores de eficiencia operacional
4. Principales indicadores de mantenimiento para aumentar la disponibilidad de los equipos.

### 4.1 Plantas de tratamiento de agua de mar en la industria minera de Chile.

En el desarrollo de una planta de tratamiento de agua de mar intervienen aspectos generales y concretos, es decir, a nivel de planificación y de ingeniería. El aspecto más importante para dilucidar en el estudio de una planta desaladora es su emplazamiento y, ligado a él, sus sistemas de captación y vertido.

Una infraestructura tipo consta de:

- Obra de toma y vertido, con sus correspondientes conducciones.
- Edificio de procesos, donde el principal es la ósmosis inversa para la producción de agua dulce.
- Depósitos de regulación y conducciones de distribución del agua desalada hasta los usuarios.
- Obras de suministro eléctrico.

Tecnologías aplicadas a la desalación

La gran mayoría de las plantas desaladoras comparten tecnología, pero algunas de ellas destacan por su innovación en algunos de estos procesos, como:

- Pretratamiento a baja velocidad con sistema de filtros abiertos y filtros presurizados.
- Sistemas de alta presión y recuperadores de energía mediante intercambiadores de presión o cámaras fijas.
- Procesos de ósmosis inversa para desalación, con membranas semipermeables de alto rendimiento, por mejoras en la tecnología de arrollamiento.
- Separación de permeados para, a diferencia de los convencionales, obtener permeado por ambos lados.
- Mejora de la calidad del producto por la eliminación del boro.
- Optimización de los sistemas de captación y vertido mixto (difusores).

#### 4.1.1 Procesos de desalinización del agua

Dentro de las tecnologías de desalinización o desalación, existen diferentes métodos para minimizar los niveles de salinidad en el agua. Los principales son:

Ósmosis inversa: se trata del sistema de desalinización más extendido y avanzado en todo el mundo. Este proceso de tratamiento de agua se realiza gracias al aporte de energía exterior en forma de presión, y que vence a la presión osmótica natural presente en dicha solución.

Destilación: el proceso consiste en calentar el agua hasta llevarla a evaporación, y posteriormente condensarla para obtener agua dulce. Se lleva a cabo en varias etapas, donde la temperatura y la presión van descendiendo hasta conseguir el resultado deseado. Además, el calor obtenido de la condensación sirve también para volver a destilar el agua.

Congelación: consiste en pulverizar agua de mar en una cámara refrigerada y a baja presión. Esto hace que se formen unos cristales de hielo sobre la salmuera, que posteriormente se separan para obtener el agua dulce.

Formación de hidratos: este proceso no se utiliza a gran escala debido a que conlleva una gran dificultad tecnológica. Consiste en añadir hidrocarburos a la solución salina que forman unos hidratos complejos en forma cristalina, que posteriormente se separan para obtener agua desalinizada.

Evaporación relámpago: aquí el agua se introduce en una cámara por debajo de la presión de saturación en forma de gotas finas. Parte de estas gotas de agua se convierten inmediatamente en vapor, que posteriormente se condensan obteniendo agua desalinizada. El agua remanente se introduce en otra cámara a presiones más bajas que la primera y se repite el proceso hasta alcanzar el rendimiento deseado.

Electrodialisis: se hace pasar una corriente eléctrica a través de una solución iónica. Los iones positivos (cationes) migrarán hacia el electrodo negativo (cátodo), mientras que los iones negativos (aniones) lo harán hacia el electrodo positivo (ánodo). Entre ambos electrodos se colocan dos membranas semi-impermeables que permiten selectivamente solo el paso del  $\text{Na}^+$  o del  $\text{Cl}^-$ , el agua contenida en el centro de la celda electrolítica se desaliniza progresivamente, obteniéndose agua dulce.



*Ilustración 2.-planta coloso Minera Escondida Ltda.BHP instituto de ingenieros Ilustración 3de minas de chile.*

En Chile, las plantas desaladoras desempeñan un papel crucial en la industria minera y en la gestión de recursos hídricos en regiones áridas y semiáridas. Estas plantas utilizan tecnología avanzada para desalar agua de mar o agua salobre, convirtiéndola en agua apta para el consumo humano, la agricultura y los procesos industriales.

Actualmente la minería utiliza sólo el 4% de agua continental, lo que ha sido posible gracias a que en sus procesos se ha incorporado en un 38% el uso de agua de mar (salada o desalinizada); junto con lo anterior, el sector actualmente reutiliza en sus procesos un 74% del agua que usa. Entre otros compromisos del sector, está que para el 2025 el 90% del agua utilizada por la industria vendrá del mar o será reutilizada. En esta nota, expertos dan detalles sobre las innovadoras y sostenibles soluciones que la industria está implementando. Extracto de ACADES (Asociación Chileno de desalación y rehusos A.G.)

La creciente demanda de agua en sectores como la minería del cobre ha impulsado la implementación de plantas desaladoras en diversas regiones del país. Estas plantas no solo garantizan un suministro sostenible de agua para las operaciones mineras, sino que también contribuyen a la conservación de los recursos hídricos terrestres.

Además, las plantas desaladoras en Chile están diseñadas para ser eficientes en cuanto al consumo de energía y respetuosas con el medio ambiente, incorporando prácticas de reutilización y reciclaje del agua tratada. Su operación y mantenimiento son fundamentales para asegurar un suministro continuo de agua de calidad y para minimizar el impacto ambiental.

#### **4.1.2 Proyección de uso de agua de mar en la industria minera de Chile**

La proyección del uso de agua de mar en la industria minera en Chile es un aspecto crucial para garantizar un suministro sostenible de agua en un contexto de escasez hídrica y demanda creciente.

En los últimos años existen varios proyectos en diferentes etapas de desarrollo que incluyen plantas desaladoras en regiones como Antofagasta, Atacama y Valparaíso (ver anexo 1), con capacidades de desalación que van desde 350.000 [m<sup>3</sup>/día] hasta 1900 [litros/segundo].

Se destaca la importancia de asegurar el suministro de agua como principal riesgo físico en la industria minera, lo que resalta la relevancia de las plantas desaladoras para abordar esta necesidad.

Las plantas desaladoras de importancia son de gran importancia para el futuro de la minería, como lo es la planta desaladora del Distrito Norte de Codelco-Chile en Antofagasta, esta tendrá una capacidad de 1956 litros/segundo, lo que refleja la importancia y la magnitud de estas instalaciones en la industria minera.

Estas proyecciones y desarrollos en plantas desaladoras en la industria minera de Chile reflejan la importancia de la gestión eficiente de los recursos hídricos y la adopción de tecnologías innovadoras para garantizar un suministro adecuado de agua en un entorno desafiante como el chileno.

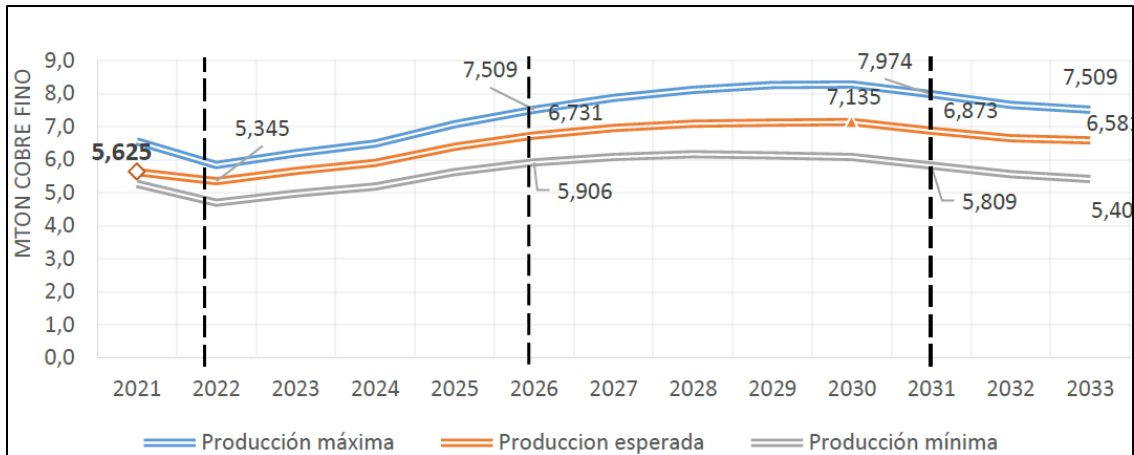


Ilustración 3.- Grafico de proyección de producción esperada de cobre 2022-2033 Cochilco.

Los principales proyectos relacionados con el uso de agua de mar en la industria minera en Chile, según Cochilco, incluyen:

Proyecto de Infraestructura Complementaria (INCO) en Coquimbo, en ejecución para el año 2025.

Optimización y Continuidad Operacional de la mina Candelaria de LUNDIN MINING en Atacama, en proceso de evaluación.

Ampliación de la mina Sierra Norte (ex Diego de Almagro) de ALXAR (COPEC) en Atacama, con aprobación para el año 2024.

Desarrollo de la mina Quebrada Blanca Hipógeno de TECK en Tarapacá, en operación con un potencial de 1.200 litros/segundo.

Proyecto de desarrollo Mantoverde de CAPSTONE en Atacama, en construcción para el año 2024.

Planta desaladora del Distrito Norte de CODELCO-CHILE en Antofagasta, con una capacidad de 1956 litros/segundo.

La proyección de demanda de agua de mar en la industria minera de Chile es un aspecto clave para planificar y gestionar de manera efectiva los recursos hídricos en un contexto de crecimiento y desarrollo de la industria minera.

Gráfico: Proyección de consumo de agua total en la minería del cobre periodo 2020-2031 [m<sup>3</sup>/seg].

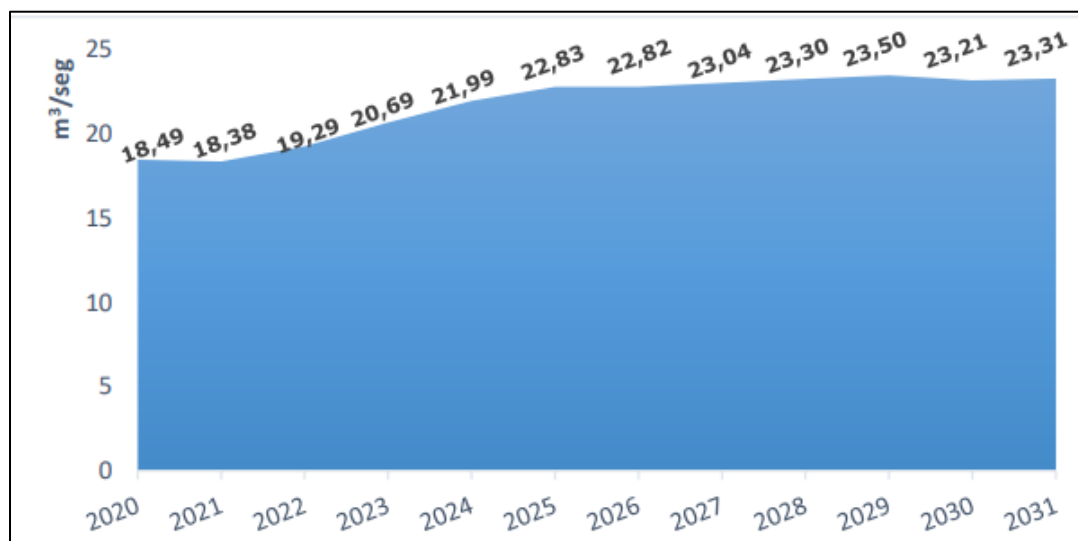


Ilustración 4.- Gráfico fuente por Deypp, Cochilco 2020.

#### 4.1.3 Proceso Minero de la industria del cobre

El consumo de agua por proceso minero para el análisis de la información, se identifican y agrupan 5 distintas áreas de consumo de agua de la industria minera del cobre en base al procesamiento de minerales y otras áreas, las cuales se describen a continuación:

- Área mina
- Área planta concentradora
- Área planta hidrometalurgia
- Fundición y refinería
- Cesión o venta a terceros
- Otros/Servicios

Diagrama de bloque de procesos mineros (cochilco).

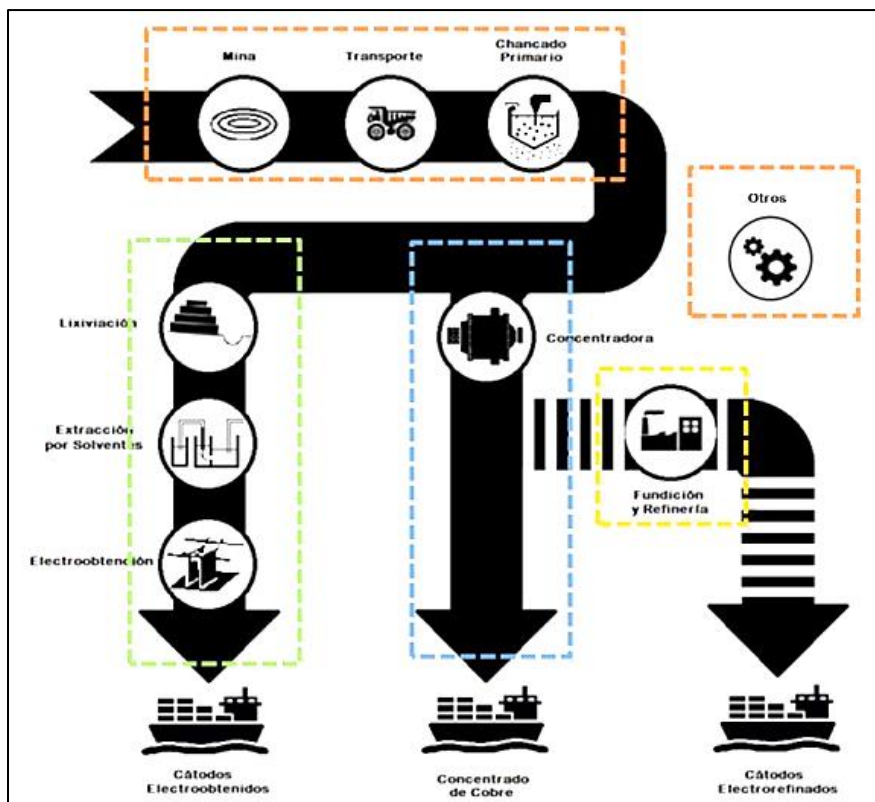


Ilustración 5.- fuente por Deypp, Cochilco 2020.

### Área Mina

Este incluye la mina, ya sea a cielo abierto o subterránea y el transporte del material hasta el chancado primario. En esta área el agua es utilizada principalmente para la supresión de polvo en caminos, y en la extracción y bombeo desde labores subterráneas.

### Área Planta Concentradora

Comprende el procesamiento de minerales, el cual representa el mayor consumo de agua con respecto a los volúmenes totales. Esta área involucra la conminución del mineral, luego la flotación, clasificación y espesamiento. Las aguas residuales de los procesos pueden o no ser recirculadas al proceso desde las lagunas de los depósitos de relaves, como de los procesos de espesamiento y filtrado, entre otros.

### Área Planta Hidrometalurgia

Considera los procesos de lixiviación en pilas, la extracción por solventes y la electro obtención para la producción de cátodos. En este proceso los principales consumos de agua resultan como consecuencia de la evaporación de las pilas de lixiviación donde se vierte una solución ácida, de

agua con ácido sulfúrico en la superficie de las pilas. Esta solución se infiltra en la pila disolviendo el cobre contenido en los minerales oxidados.

### Fundición y Refinería

El concentrado seco se somete a un proceso de pirometalurgia para obtener placas gruesas, de forma de ánodos. Este es comercializado directamente o enviado al proceso de refinación la cual se lleva a cabo en las celdas electrolíticas en una solución de ácido sulfúrico. Se le aplica una corriente eléctrica, que hace que se disuelva el cobre del ánodo y se deposite en el cátodo inicial, lográndose cátodos de alta pureza.

### Aguas adquiridas a terceros

Corresponde a flujos de agua obtenida mediante contratos con terceros. Compra de agua directamente a terceros con sus derechos respectivos, de esta manera no se compran los derechos, sino que el agua. Puede ser obtenida de aguas municipales, de sanitarias, entre otros proveedores.

### Otros

Se agrupan todas aquellas actividades con volúmenes de consumo de agua poco significativos frente al total consumido en una operación minera principalmente para abastecer los servicios. El principal uso del agua es para bebida, cocción, lavado, riego y baños en los campamentos, y otros consumos menores.

El consumo agua en proceso de la minería del cobre en el año 2020 según Cochilco es el siguiente:

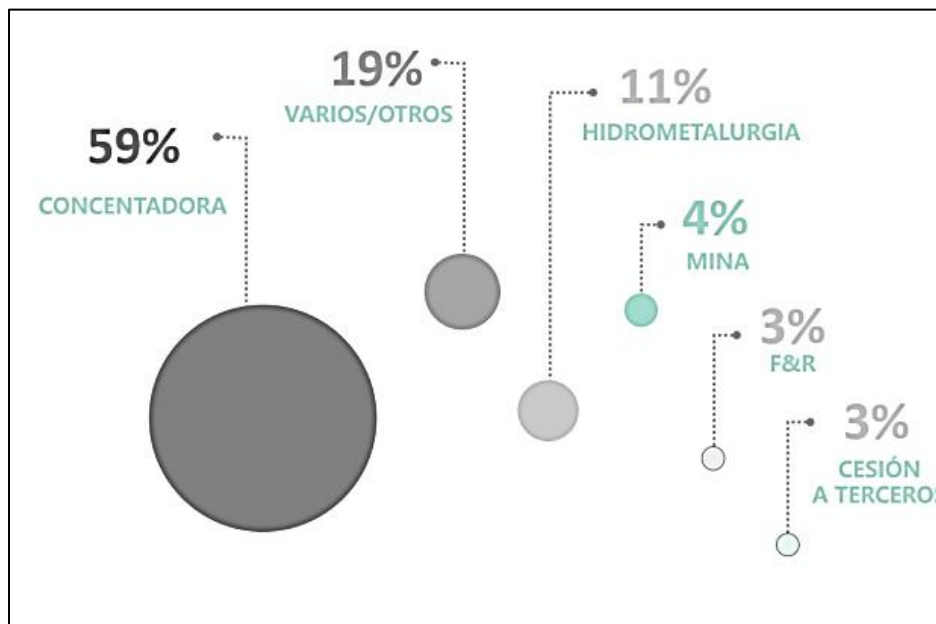


Ilustración 6.- Gráfico fuente por Deypp, Cochilco 2020.

#### 4.1.4 Proceso de una Planta de tratamiento de agua de mar promedio en la industria minera de Chile.

Las unidades primarias del proceso directamente afiliadas al proceso de producción y entrega del producto, que se denomina unidad de proceso primaria para una planta promedio en la industria minera.

Las unidades secundarias del proceso indirectamente afiliadas al proceso de producción y entrega del producto, que se denomina unidades de proceso secundario.

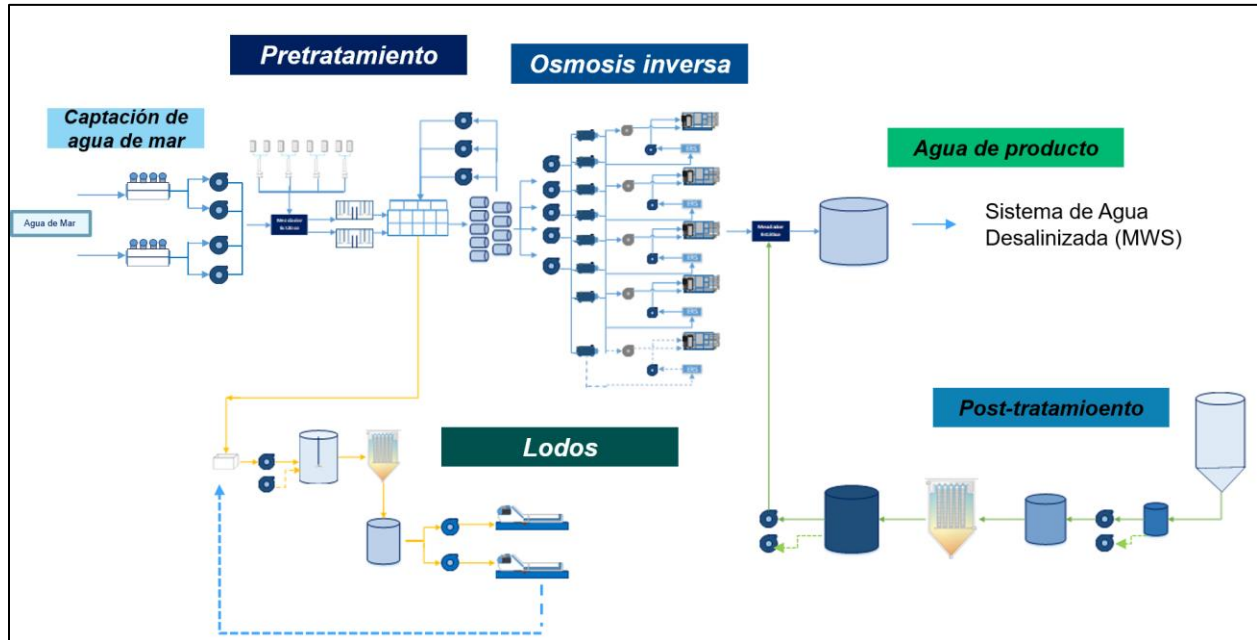


Ilustración 7.- Diagrama de flujo planta de tratamiento de agua de mar para mineras. Fuente: Elaboración propia

Las unidades de proceso principales son:

- 1) Captación de agua de mar

La captación constituye la primera etapa del proceso de tratamiento, en la cual el agua de mar es extraída desde el océano a través de una obra de toma diseñada para operar en condiciones costeras variables. En esta fase, se incorporan sistemas de filtración inicial con mallas de retención de sólidos gruesos y material orgánico flotante, los cuales se limpian mediante inyección de aire comprimido en ciclos programados. Simultáneamente, se realiza la dosificación de productos químicos como biocidas o dispersantes para prevenir la formación de incrustaciones o crecimiento biológico. El agua captada es impulsada mediante estaciones de bombeo de alta confiabilidad hasta la planta desaladora, específicamente al área de pretratamiento. La continuidad de este proceso es crítica para asegurar la estabilidad del flujo hacia las etapas posteriores y evitar pérdidas operacionales por interrupciones en la captación.

## 2) Pretratamiento.

El pretratamiento tiene como objetivo acondicionar el agua de mar captada para su ingreso al sistema de ósmosis inversa, removiendo eficientemente los sólidos en suspensión y otros contaminantes que puedan comprometer la integridad de las membranas. El agua se almacena inicialmente en estanques de retención construidos en hormigón, desde donde es enviada a través de bombas a unidades de filtración que emplean medios como arena, antracita o lechos mixtos. Los lodos y residuos generados en esta etapa son derivados a un sistema de recolección y evacuación hacia pozos de recepción de efluentes. El agua clarificada, libre de sólidos mayores, es posteriormente enviada a filtros de pulido y/o cartuchos, elevando el nivel de calidad del fluido antes de su ingreso a la etapa de desalinización. Esta fase es fundamental para reducir la carga sobre las membranas y extender su vida útil, garantizando la eficiencia del proceso global.

## 3) Ósmosis Inversa

La ósmosis inversa (Reverse Osmosis: RO, por sus siglas en inglés) representa la etapa central del proceso de desalación. En esta fase, el agua pretratada es sometida a alta presión para atravesar membranas semipermeables que permiten el paso del agua, pero rechazan sales y otros contaminantes disueltos. El proceso genera dos corrientes diferenciadas: el permeado, que es el agua desalada y de alta pureza, y el rechazo o salmuera concentrada. El permeado es conducido al sistema de posttratamiento, mientras que la salmuera es evacuada hacia un estanque de acumulación o hacia un sistema de descarga controlado.

De forma periódica, se efectúan ciclos de desplazamiento en el lado del rechazo, empleando agua permeada a baja presión para barrer concentraciones acumuladas y sedimentos que puedan afectar la eficiencia del sistema. Esta acción contribuye al mantenimiento de la performance hidráulica del tren de ósmosis, minimizando pérdidas de presión y evitando la colmatación prematura de las membranas. Esta etapa requiere monitoreo en línea de parámetros como conductividad, caudal y presión diferencial, integrándose como una fuente de datos clave para los indicadores de eficiencia operacional definidos en esta investigación.

Incluyen generalmente:

- Rack o Trenes de ósmosis inversa con agua de mar.
- Sistema de Recuperación de Energía (ERS)
- Bombas de alta presión
- Descarga de Salmuera
- Post- tratamiento
- Sistema de agua potable.

#### 4) Las unidades de proceso secundarias son:

Las unidades de proceso secundarias cumplen funciones de soporte esenciales para asegurar la estabilidad operacional, la calidad del agua producida y la gestión eficiente de residuos. Aunque no forman parte directa del tren principal de desalinización, estas unidades tienen un impacto significativo en los indicadores de eficiencia operacional y en la continuidad del servicio. A continuación, se describen las principales:

- Tratamiento de lodos

Esta unidad tiene como función principal la gestión de los residuos sólidos generados en las etapas de pretratamiento (principalmente lodos provenientes de filtros de arena, medios mixtos y retrolavados). El sistema contempla pozos de recolección, sedimentación, y en algunos casos, deshidratación de lodos mediante filtros prensa u otras tecnologías. Un tratamiento adecuado de los lodos minimiza los impactos ambientales y permite mantener condiciones operativas estables, reduciendo paradas no programadas por acumulación de residuos.

- Post-tratamiento: Sistemas de dosificación química y sistema de lavado.

Incluye los sistemas de dosificación química, necesarios para ajustar los parámetros del agua desalada (como pH, alcalinidad o remineralización), garantizando su compatibilidad con los estándares exigidos por los procesos mineros aguas abajo. Además, esta unidad contempla el sistema de lavado y limpieza (CIP) de membranas, el cual permite remover incrustaciones orgánicas e inorgánicas acumuladas en los trenes de ósmosis inversa. El diseño de estas actividades de mantenimiento preventivo es clave para preservar la eficiencia del proceso, alargando la vida útil de los elementos filtrantes.

- Agua de producto.

Para lograr las condiciones requeridas en el agua desalinizada que se entrega al proceso industrial, el permeado de ósmosis inversa debe ser sometido a un postratamiento que asegure el cumplimiento de parámetros de calidad. Las características técnicas exigidas para el agua producto, luego del proceso de postratamiento, son:

Para agua de producto, las especificaciones son las siguientes:

- TDS <1500 ppm
- Cloruro de iones <400 ppm
- 7.5 <pH <8.5
- 0<LSI<0.5

Estas especificaciones serán consideradas posteriormente en el capítulo de aporte al conocimiento, dentro del eje de calidad del proceso, como referencia para establecer umbrales operativos y metas cuantificables asociadas al desempeño técnico de la planta.

Donde:

TDS: Es el porcentaje de residuo seco que engloba sales inorgánicas y pequeñas cantidades de materia orgánica disueltas en el agua.

pH: Es una medida de la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) en una solución acuosa.

LSI: El índice de saturación de Langelier (LSI) es un conjunto de parámetros del agua que proporcionan estabilidad al agua al usarse como un indicador de la corrosividad del agua de alimentación.

Para agua potable las especificaciones son las siguientes:

Según la norma chilena Nch409, la calidad del agua potable debe cumplir con las siguientes especificaciones:

- TDS <1500 mg / l
- Cloruro iónico <400 mg / l
- $6.5 < pH < 8.5$
- Turbidez <2 NTU
- Cloro libre entre 0.2mg / los 2 mg / l

## 4.2 Cálculo del OEE: Desempeño operacional.

El OEE (Overall Equipment Effectiveness o Eficiencia General de los Equipos) es una razón porcentual que sirve para medir la eficiencia productiva de la maquinaria industrial. Es un indicador que se emplea para medir el rendimiento y productividad de las líneas de producción en las que la maquinaria tiene gran influencia. La ventaja del OEE frente a otras razones es que mide, en un único indicador, todos los parámetros fundamentales en la producción industrial: la disponibilidad, el rendimiento y la calidad. Tener un OEE de, por ejemplo el 40%, significa que de cada 100 piezas buenas que la máquina podría haber producido, sólo ha producido 40 piezas. Se dice que engloba todos los parámetros fundamentales, porque del análisis de las tres razones que forman el OEE, es posible saber si lo que falta hasta 100% se ha perdido por disponibilidad (la maquinaria estuvo cierto tiempo parada), rendimiento (la maquinaria estuvo funcionando a menos de su capacidad total) o calidad (se ha producido unidades defectuosas) (Cruelles Ruíz, 2010).

OEE fue utilizado por primera vez por Seiichi Nakajima, el fundador del TPM (Total Productive Maintenance), como la herramienta de medición fundamental para conocer el rendimiento productivo de la maquinaria industrial. Su reto fue aún mayor al crear un sentimiento de responsabilidad conjunta entre los operarios de las máquinas y los responsables de mantenimiento para trabajar en la mejora continua y optimizar la Eficiencia Global de los Equipos (OEE) (Sist. OEE de productividad industrial, 2011).

Algunos de los objetivos que persigue el OEE son:

- Mediante el análisis del OEE se puede detectar las fallas más comunes a fin de mejorar los puntos débiles de la planta
- Se pretende reducir los costos relacionados con las pérdidas de mantenimiento y calidad
- Se desea establecer un costo efectivo de mantenimiento. Los objetivos del OEE tienen como finalidad hacer más productiva y eficiente la planta, por lo tanto la reducción de costos (Sist. OEE de productividad industrial, 2011).

El OEE resulta de multiplicar otras tres razones porcentuales: la Disponibilidad, el Rendimiento y la Calidad.

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

Donde:

- Disponibilidad: cuánto tiempo ha estado funcionando la máquina o equipo respecto del tiempo que se planificó que estuviera funcionando.
- Rendimiento: durante el tiempo que ha estado funcionando, cuánto ha fabricado (bueno y malo) respecto de lo que tenía que haber fabricado a tiempo de ciclo ideal.
- Calidad: es el indicador más conocido de todos. Cuánto he fabricado bueno a la primera respecto del Total de la Producción realizada (Bueno + Malo).

Disponibilidad en OEE Incluye: Pérdidas de Tiempo Productivo por Paradas La Disponibilidad resulta de dividir el tiempo que la máquina ha estado produciendo (Tiempo de Operación: TO)

por el tiempo que la máquina podría haber estado produciendo. El tiempo que la máquina podría haber estado produciendo (Tiempo Planificado de Producción: TPO) es el tiempo total menos los períodos en los que no estaba planificado producir por razones legales, festivos, almuerzos, mantenimientos programados, etc., lo que se denominan Paradas Planificadas (Cruelles Ruíz, 2010).

$$\text{Disponibilidad} = (\text{TO}/\text{TPO}) * 100$$

Donde:

TPO: Tiempo total de trabajo – Tiempo de paradas planificadas.

TO: TPO – (fallas y/o averías)

La disponibilidad es un valor entre 0 y 1 por lo que se suele expresar porcentualmente.

### Rendimiento en OEE

Incluye:

- Pérdidas de velocidad por pequeñas paradas
- Pérdidas de velocidad por reducción de velocidad

El rendimiento resulta de dividir la cantidad de piezas realmente producidas por la cantidad de piezas que se podrían haber producido durante el tiempo de disponibilidad de la máquina. La cantidad de piezas que se podrían haber producido se obtiene multiplicando el tiempo en producción por la capacidad de producción nominal de la máquina (Cruelles Ruíz, 2010).

Siendo:

Capacidad Nominal: la capacidad de la máquina/línea declarada en la especificación (normativa DIN 8743), se denomina también Velocidad Máxima u óptima equivalente a:

Rendimiento Ideal que se mide en: Número de Unidades/Hora. La Capacidad Nominal, es lo primero que debe ser establecido. En general, esta Capacidad es proporcionada por el fabricante, aunque suele ser una aproximación, ya que puede variar considerablemente según las condiciones en que se opera la máquina o línea. Es mejor realizar ensayos para determinar el verdadero valor. La capacidad nominal deberá ser determinada para cada producto (incluyendo formato y presentación). El valor será siempre el referido al producto final que sale de la línea. Rendimiento tiene en cuenta todas las pérdidas de velocidad (Cruelles Ruíz, 2010).

$$\text{Rendimiento} = \text{N}^\circ \text{ total de unidades} / (\text{PPP}).$$

Donde:

La cantidad de piezas que se podrían haber producido (PPP) = tiempo de Operación x Capacidad nominal.

Calidad en OEE Incluye:

Pérdidas por Calidad El tiempo empleado para fabricar productos defectuosos deberá ser estimado y sumado al tiempo de Paradas, ya que durante ese tiempo no se han fabricado productos conformes. Por lo tanto, la pérdida de calidad implica dos tipos de pérdidas:

- Pérdida de Calidad, igual al número de unidades malas fabricadas.
- Pérdida de Tiempo Productivo, igual al tiempo empleado en fabricar las unidades defectuosas.

Adicionalmente, en función de que las unidades sean o no válidas para ser reprocesadas, influyen:

- Tiempo de reprocesado.
- Costo de tirar, reciclar, etc, las unidades malas.

Tiene en cuenta todas las pérdidas de calidad del producto. Se mide en tanto por uno o tanto por ciento de unidades no conformes con respecto al número total de unidades fabricadas.

Calidad= N° de unidades conformes / N° de unidades totales.

La métrica OEE (Overall Equipment Effectiveness) considera como buenas únicamente aquellas unidades que cumplen con las especificaciones desde el primer intento; es decir, no incluye piezas reprocesadas. En consecuencia, todas las unidades que requieren retrabajo deben contabilizarse como rechazos o productos no conformes. Por ello, el componente de Calidad dentro del cálculo del OEE se define como la razón entre las unidades buenas producidas y el total de unidades fabricadas, incluyendo aquellas retrabajadas o desechadas (Cruelles Ruíz, 2010).

En el contexto de esta tesina, dicha variable será abordada desde la perspectiva del proceso de tratamiento de agua de mar, adaptando su interpretación al entorno operativo de plantas desaladoras, con el fin de facilitar su comprensión y análisis por parte del lector.

Asimismo, es fundamental que las áreas involucradas en la operación, mantenimiento, confiabilidad, planificación, entre otras, según la estructura organizacional de cada compañía minera trabajen de manera coordinada y articulada, evitando operar como unidades aisladas. Solo mediante una integración efectiva de estas funciones será posible alcanzar los niveles de desempeño proyectados en el modelo OEE.

Finalmente, se recomienda establecer rutinas sistemáticas de revisión o reuniones interáreas que aseguren la correcta declaración e imputación de las causas de detención. Es esencial que los tiempos registrados reflejen fielmente las actividades reales del proceso, tanto en el ámbito operacional como en el de mantenimiento, para garantizar la veracidad del análisis y la toma de decisiones.

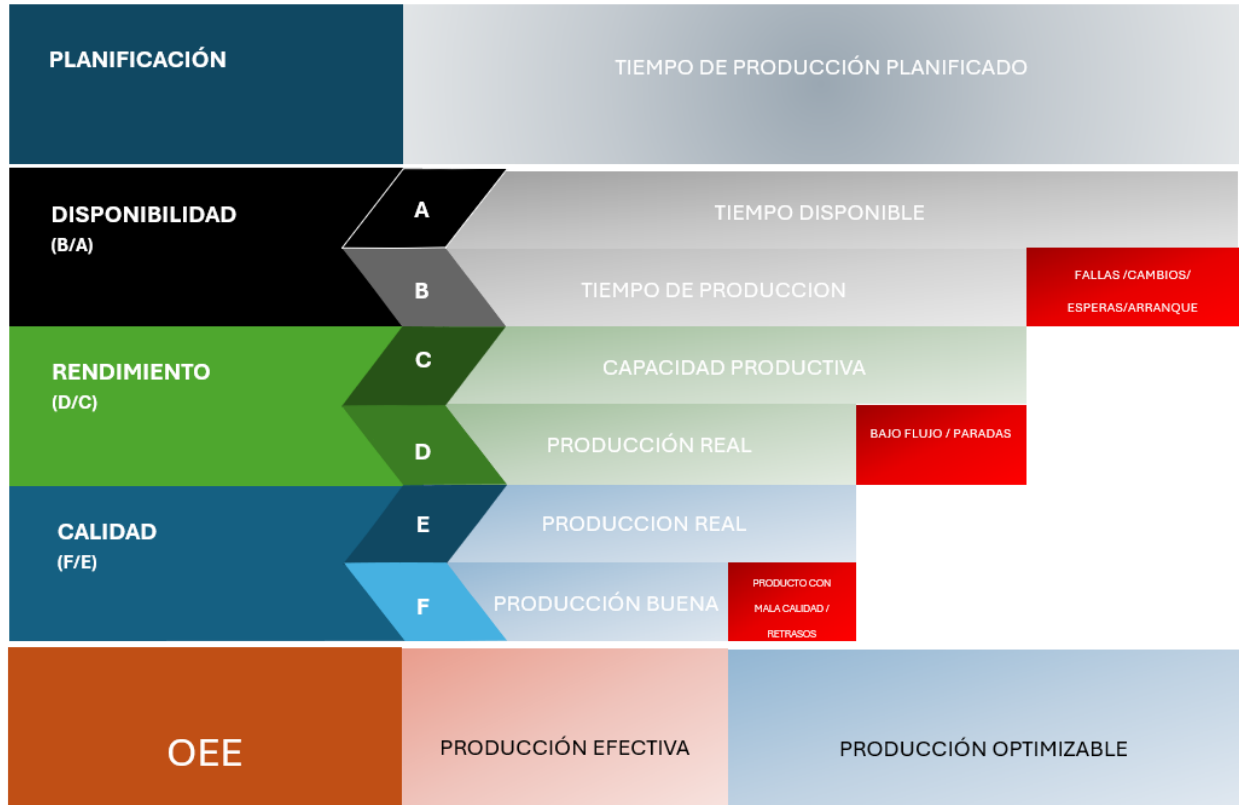


Ilustración 8.- Presentación OEE Eficiencia General de los Equipos General, Elaboración propia

### 4.3 Definición de indicadores de eficiencia operacional

La medición precisa del desempeño operativo en plantas productivas requiere descomponer el tiempo disponible en componentes funcionales que permitan identificar y cuantificar pérdidas. Para ello, es esencial estructurar indicadores de eficiencia operacional que se sustenten en variables claramente definidas, registrables y alineadas con los objetivos estratégicos de productividad y calidad. A continuación, se detallan las principales definiciones:

#### a) Tiempo de Turno (Tturno)

Corresponde al total de horas semanales en que los operadores están presentes por contrato en sus puestos de trabajo. Varía según el esquema de turnos:

- Proceso con 3 turnos de 8 horas de lunes a viernes más 5 horas el sábado: 45 horas/semana  $\times$  3 turnos = 135 hrs/semana.
- Proceso con cobertura continua 24/5 (lunes a viernes): 120 hrs/semana.

Este tiempo representa el marco teórico de presencia operacional.

#### b) Tiempo de Carga (Tcarga)

Es el tiempo disponible efectivo, descontando del Tiempo de Turno los periodos sin uso productivo por:

Paradas Programadas (PPSP).

Ausencia de órdenes de trabajo.

Motivos operacionales no asignables a tareas.

Este valor marca el límite máximo teórico para ejecutar operaciones productivas bajo condiciones normales.

#### c) Paradas Programadas (PPSP)

Tiempos no productivos, aunque con personal presente, asociados a actividades planificadas:

De proceso: aseos, inicios/términos de producción, ensayos técnicos.

De gestión: capacitaciones, entregas de turno, reuniones administrativas o sindicales.

Por no uso: cuando la línea se encuentra completamente inactiva, sin producción ni mantenimiento (p. ej., feriados, fines de semana sin turno, proyectos de inversión).

#### d) Tiempo de Operación (Toperación)

Resulta de descontar del Tiempo de Carga las pérdidas por:

Mantenciones (Man): trabajos de mantenimiento autónomo, preventivo o correctivo, cambios de piezas, inspecciones.

Paradas por fallas (Breakdown): fallas no planificadas que superen los 5 minutos, sean mecánicas, eléctricas o de dotación mínima.

Setup de línea (Setup): cambios de formato, ajustes previos a la producción.

Paradas sin clasificación (Nulo): interrupciones no controlables (falta de insumos, mala calidad de materias primas, etc.).

#### e) Tiempo Neto (Tneto)

Se obtiene al descontar del Tiempo de Operación las pérdidas de velocidad (Pvelocidad). Estas pérdidas se producen cuando el proceso opera por debajo de su capacidad nominal, especialmente en arranques y cierres.

También se consideran las detenciones menores ( $\leq 3$  min), muchas veces no registradas pero recurrentes, que afectan significativamente al cuello de botella.

#### f) Tiempo Agregando Valor (TAV) o Tiempo Útil.

Corresponde al tiempo realmente productivo, es decir, el tiempo utilizado para producir unidades dentro de las especificaciones de calidad.

Puede calcularse como:

$TAV = \text{Volumen de producto conforme} / \text{Velocidad nominal} = T_{\text{útil}}$ .

Este es el tiempo efectivo que genera valor para el cliente y debe ser maximizado.

#### g) Pérdidas por Calidad (Lcalidad)

Incluyen:

Detenciones para evitar producción defectuosa.

Unidades malas que pasaron por el cuello de botella, calculadas como volumen defectuoso / velocidad nominal.

h) Estas pérdidas impactan tanto en la eficiencia como en los costos, y requieren un control estricto.

Pérdidas por unidades declaradas malas.

Incluye a la cantidad de producto con defectos de calidad que pasó por el cuello de botella, y que corresponde al volumen de producto que no cumple con las especificaciones de calidad dividido por su velocidad nominal

la correcta definición de variables operacionales es un componente esencial para estructurar indicadores de eficiencia confiables, accionables y alineados con los objetivos estratégicos de productividad. Estas variables permiten descomponer el tiempo disponible de operación en unidades funcionales que reflejan de manera precisa cómo se utiliza la capacidad instalada y cuáles son las principales fuentes de pérdida o mejora.

Al integrarse con indicadores clave como OEE, MTBF, MTTR y Disponibilidad Operacional, estas variables fortalecen la trazabilidad de datos, facilitan el establecimiento de metas cuantificables y orientan los esfuerzos de mejora continua.



Ilustración 9.- Presentación OEE con tiempo de carga, operación, neto y útil, Elaboración propia.

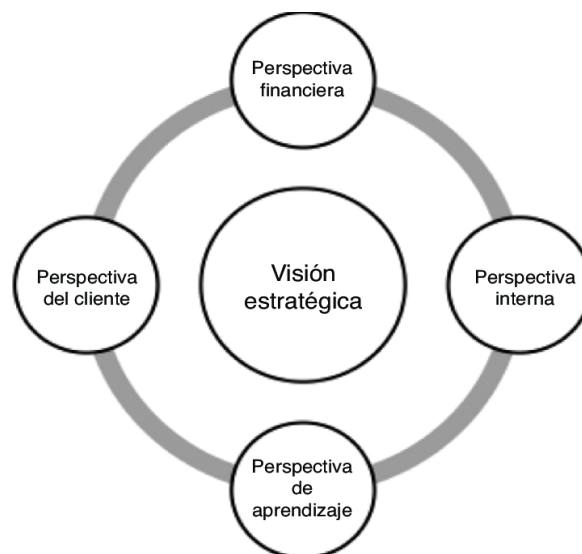
#### 4.4 El modelo de Cuadro de Mando Integral (CMI).

El modelo desarrollado por *Kaplan y Norton*, permite traducir la visión y estrategia de una organización en un conjunto coherente de indicadores de desempeño, organizados en cuatro perspectivas clave: financiera, clientes, procesos internos, y aprendizaje y crecimiento. Esta estructura conecta la visión de largo plazo con la gestión táctica y operativa diaria, al alinear los objetivos estratégicos con metas medibles y acciones concretas en todos los niveles de la organización. La implementación del CMI facilita el despliegue estratégico, promueve la asignación eficiente de recursos, mejora la toma de decisiones basada en datos y fortalece la mejora continua de procesos críticos.

En contextos industriales, como las plantas de tratamiento de agua de mar en la minería, el CMI permite visualizar y gestionar en tiempo real el impacto de las operaciones sobre el cumplimiento de metas estratégicas, aportando a una gobernanza más efectiva y a un desempeño operacional sostenido.

Las cuatro perspectivas del modelo proporcionan una visión integral del desempeño organizacional:

- **Financiera:** Evalúa si la estrategia contribuye a mejorar los resultados económicos, a través de indicadores como ingresos, costos operacionales, márgenes o retorno sobre la inversión.
- **Clientes:** Mide la percepción de los clientes sobre el valor entregado, incluyendo satisfacción, fidelización y participación de mercado.
- **Procesos Internos:** Se centra en los procesos clave que permiten entregar valor, mejorar la eficiencia operativa y asegurar la calidad del servicio.
- **Aprendizaje y Crecimiento:** Considera el desarrollo de capacidades del personal, la cultura organizacional y la infraestructura tecnológica que sustenta la innovación y la mejora continua.



*Ilustración 10.- Presentación El modelo desarrollado por Kaplan y Norton.*

## 4.5 Indicadores Claves en la Gestión de Activos.

La gestión de activos físicos adquiere un rol estratégico fundamental. Según la bibliografía especializada de Adolfo Arata, particularmente en sus obras *“Ingeniería y Gestión de la Confiabilidad Operacional en Plantas Industriales”* e *“Ingeniería de la Confiabilidad”*, se establece la necesidad de implementar indicadores cuantitativos que permitan evaluar, de manera sistemática, la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad de los equipos a lo largo de su ciclo de vida útil.

Estos indicadores no solo permiten monitorear el estado operacional de los activos, sino que constituyen herramientas clave para:

- Optimizar la planificación del mantenimiento.
- Tomar decisiones basadas en evidencia respecto a inversiones, reemplazos o rediseños.
- Reducir riesgos derivados de fallas críticas en equipos estratégicos.
- Incrementar la continuidad operacional y la eficiencia global del proceso.

La aplicación rigurosa de estos indicadores es especialmente crítica donde las detenciones no planificadas tienen efectos directos sobre la productividad, los costos operativos y la sustentabilidad del proceso. Los indicadores más relevantes son:

### 4.5.1 Indicadores MTTR y MTBF en la Gestión de Activos.

#### **MTTR – Mean Time to Repair (Tiempo Medio de Reparación)**

Representa el tiempo promedio requerido para reparar un equipo una vez que ha fallado, incluyendo detección, diagnóstico, ejecución de la reparación y retorno al servicio.

Un MTTR bajo indica una respuesta ágil del sistema de mantenimiento, mejorando la disponibilidad y reduciendo el impacto económico de las fallas. Por lo tanto es clave en equipos críticos como bombas de alta presión, trenes de ósmosis o sistemas de pretratamiento, donde los tiempos fuera de servicio generan grandes pérdidas de caudal de agua de proceso.

Fórmula:

$$MTTR = (\text{Tiempo total de reparación})/(\text{Numero total de fallas})$$

#### **MTBF – Mean Time Between Failures (Tiempo Medio entre Fallas)**

Mide el intervalo promedio entre una falla y la siguiente, durante el funcionamiento normal del equipo. Un MTBF alto refleja alta confiabilidad, lo que significa que los equipos funcionan por más tiempo sin interrupciones.

Permite anticipar el comportamiento de componentes críticos como membranas, válvulas, motores o sensores, ayudando a definir ventanas de mantenimiento predictivo o preventivo.

Fórmula:

$$MTBF = (\textit{Tiempo total de operación})/(\textit{Numero total de fallas})$$

Ambos indicadores deben ser integrados en el Cuadro de Mando de Eficiencia Operacional, junto con otros como el OEE, el Tiempo Útil o la Disponibilidad, para facilitar la toma de decisiones en tiempo real, respaldadas por datos confiables. Asimismo, deben ser objeto de seguimiento mensual, análisis de tendencias, y servir como base para establecer metas SMART de mejora continua, alineadas con los principios de Excelencia Operacional.

### 4.5.2 Disponibilidad Operacional

La disponibilidad operacional es un indicador clave que refleja la proporción de tiempo en que un equipo o sistema está efectivamente disponible para cumplir su función, en relación con el tiempo total considerado. Esta métrica integra dos dimensiones fundamentales de la gestión del mantenimiento: la confiabilidad (frecuencia de fallas) y la mantenibilidad (tiempo de reparación), ofreciendo así una visión integral del desempeño técnico del activo.

Un valor elevado de disponibilidad sugiere que el equipo se encuentra operando de manera continua, con interrupciones mínimas, lo que es esencial en procesos industriales de operación continua como el tratamiento de agua de mar. Su cálculo se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Disponibilidad} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

#### 1. Número de Fallos de Equipos

Corresponde a la cantidad total de fallas registradas en un período determinado para un equipo o conjunto de equipos. Un número elevado de fallas puede indicar problemas de confiabilidad, mantenimiento inadecuado o condiciones operativas fuera de rango.

Es un insumo clave para calcular MTTR y MTBF, y para determinar tendencias de deterioro.

Fórmula:

Número de Fallos = Conteo total de eventos de falla registrados

#### 2. Costos de Paradas Debidas a Fallos

Representa el costo total asociado a las detenciones no planificadas causadas por fallas de equipos. Incluye costos directos e indirectos. Refleja el impacto financiero de la falta de disponibilidad operativa.

Permite justificar inversiones en mantenimiento preventivo y mejora tecnológica.

Fórmula:

Costos por Fallos = (Horas de parada) × (Costo por hora de detención) + Costos de reparación + Costos de oportunidad

## **5.- APOORTE AL CONOCIMIENTO**

En esta fase se desarrollará la propuesta metodológica basada en un modelo de Planificación Estratégica para la gestión del desempeño operacional en plantas de tratamiento de agua de mar, aplicable a la industria minera chilena. El objetivo es generar un aporte práctico y replicable que permita optimizar los procesos productivos mediante una gestión eficiente de los activos.

La metodología estará estructurada en cuatro etapas fundamentales:

### **1: Definición de Indicadores Clave de Eficiencia Operacional:**

Esta etapa se enfoca en establecer los KPIs fundamentales, como el OEE, la disponibilidad el rendimiento y la calidad, considerando la naturaleza continua del proceso de desalación.

### **2: Aplicación y Análisis de Indicadores Operacionales en Procesos Continuos:**

Se identifican las variables críticas que alimentan los indicadores definidos, y se analiza su desempeño bajo condiciones reales, asegurando trazabilidad y representatividad.

### **3: Establecimiento de Metas Cuantificables para los Indicadores de Desempeño:**

En esta etapa se definen metas SMART a partir de criterios técnicos, estadísticos e industriales, permitiendo el seguimiento comparativo y el control del avance.

### **4: Formulación de Estrategia de Eficiencia Operacional y Gestión de Brechas:**

Se despliega el Cuadro de Mando Integral con indicadores y metas, incorporando análisis de brechas operacionales (Pareto y Jack Knife) y planes de acción, con enfoque en mantenimiento proactivo y mejora continua.

## 5.1 Definición de indicadores de eficiencia operacional adaptados para el tratamiento de agua de mar.

La evaluación de la eficiencia operacional requiere indicadores específicos que reflejen adecuadamente las condiciones y desafíos técnicos propios de este tipo de instalaciones. En este contexto, se adopta como indicador central el OEE, ya que permite integrar tres dimensiones clave del desempeño: disponibilidad, rendimiento y calidad.

El presente apartado introduce la definición conceptual y operativa del OEE, adaptada a los procesos de tratamiento continuo del agua de mar. Para ello, se considera la estructura de tiempos involucrada en la operación, estableciendo una base común para el cálculo de los indicadores que permiten cuantificar las pérdidas de eficiencia en términos de paradas, bajo rendimiento o producción fuera de especificación.

A continuación, se presenta una gráfica ilustrativa que resume el desglose del tiempo productivo y cómo se relaciona con las componentes del OEE, facilitando su comprensión e implementación como herramienta de diagnóstico y mejora continua en plantas desaladoras:



Ilustración 11.- Presentación del OEE general.

De acuerdo con lo anterior, el Cálculo del OEE, para una Planta de Tratamiento de Agua sería el siguiente:

### A. Tiempo de Carga.

Corresponde al período durante el cual se planifica que la planta esté operativa. Para efectos del cálculo del Desempeño Operacional (OEE), este tiempo se obtiene al descontar del tiempo total del turno tanto las paradas programadas (como mantenimientos preventivos o limpiezas planificadas) como los periodos sin producción (por ejemplo, esperas por calidad de agua cruda, validaciones operacionales o falta de demanda aguas abajo).

En este sentido, el Tiempo de Carga representa el horizonte de tiempo efectivamente disponible para evaluar el rendimiento del proceso bajo condiciones normales de operación.

## TIEMPO DE CARGA:

Tiempo de Turno – Tiempo de Paradas Programadas – Tiempo Sin Producción

La siguiente tabla presenta los indicadores clave que permiten definir y calcular el tiempo de carga, junto con sus objetivos en el proceso y su aplicación específica.

Indicadores Según marco teórico	Objetivo en el proceso	Definición para el tratamiento de agua de mar.
Tiempo de Turno (Tturno)	Planificar la operación del proceso para el cumplimiento de las metas de operación.	Los tiempos de turno, serán los siguientes: Para este caso será en turnos de 7*7 (siete días de trabajo con siete días de descanso) con 12 horas de turno divididos por día y noche desde un miércoles a martes, se considera 24 horas * 7 días = 168 [hrs] semanales totales.
Paradas Programadas (PPSP)	Planificar tiempos No productivos para identificar la disponibilidad del proceso que coincida con la estimación de volumen en este caso metros cúbicos de producción esperado.	Actividades no productivas deben ejecutarse sin detener la operación 24/7, con lo cual las paradas programadas, serán las siguientes:  Aseos o desinfecciones.
Tiempo sin producción	Identificar claramente los períodos en los que la planta no produce por causas externas al proceso.	Se refiere a los períodos en los que la planta, aun estando disponible técnicamente, no tiene producción programada. Serán las siguientes: baja demanda de agua tratada, detenciones por restricciones aguas abajo o contingencias externas al proceso.

Tabla 1.- indicador, objetivo y definición del tiempo de carga.

Cálculo considerando agrupación de líneas.

En sistemas que operan con múltiples líneas de tratamiento paralelas (por ejemplo, trenes de ósmosis inversa), el Tiempo de Carga puede calcularse agregando o promediando el tiempo efectivo de operación de cada línea. Esto permite identificar cuellos de botella específicos o evaluar eficiencia global de la planta.

## B. Disponibilidad.

### Tiempo de Operación:

Corresponde al tiempo real de operación descontando las paradas no programadas. El tiempo que se planifica que el proceso de tratamiento de agua debiera funcionar corresponde al tiempo de carga, a este tiempo se descuenta el tiempo de las paradas no programadas y se obtiene el tiempo de operación.

**Tiempo de Operación = Tiempo de Carga - Tiempo de Paradas No Programadas, donde:**

Para este cálculo, se descuentan las Paradas No Programadas, que corresponden a interrupciones no planificadas que generan pérdida de desempeño operacional. Estas pueden ser provocadas por fallas en equipos críticos (como bombas de alta presión, trenes de ósmosis inversa, sistemas de control o válvulas automáticas), fallas eléctricas, alarmas de emergencia, entre otras contingencias.

## TIEMPO DE OPERACIÓN

Tiempo de Carga - Tiempo de Paradas

No Programadas

A continuación, se detallan los principales indicadores relacionados con el tiempo de operación, considerando su objetivo funcional y su definición adaptada para el proceso de una planta desaladora.

Indicadores Según marco teórico	Objetivo en el proceso	Definición para el tratamiento de agua de mar.
Tiempo de Carga (Tcarga)	Mantener continuidad operacional las 24 horas.	Asegurar el máximo aprovechamiento del tiempo disponible para operar los activos sin interrupciones planificadas.
Tiempo de Paradas No Programadas	Ampliar el MTBF. Controlar pérdidas por causas externas al equipo.	Fallas no planificadas en equipos, sistemas de control o instrumentación que interrumpen la operación de la planta. Interrupciones del proceso cuyo origen está fuera del control operativo, como escasez de insumos químicos, eventos naturales (mareas rojas) o condiciones externas.

Tabla 2. - indicador, objetivo y definición del tiempo de operación.

Con este tiempo de operación, se calcula el indicador de disponibilidad con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Disponibilidad} = (\text{Tiempo Operación} / \text{Tiempo Carga}) * 100$$

Cálculo considerando agrupación de líneas

El cálculo de este tiempo aplicando filtros proceso y en general de la planta, con lo cual, al realizar agrupaciones, se suman los tiempos de carga y los tiempos de paradas no programadas de cada equipo crítico, para realizar un cálculo exacto del tiempo de operación y del indicador de % disponibilidad.

### C. Rendimiento.

#### Tiempo Neto

Es el tiempo efectivo de operación de la planta descontando las pérdidas por velocidad, es decir, el tiempo en que la planta operó a caudales inferiores al flujo de diseño. Representa el período en que se alcanzó, o se estuvo más cerca de alcanzar, la capacidad óptima de tratamiento, se realiza el siguiente cálculo:

#### TIEMPO NETO

Tiempo de Operación – Tiempo por Pérdidas de Velocidad

Con este tiempo Neto, se calcula el indicador de rendimiento con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Rendimiento} = (\text{Tiempo Neto} / \text{Tiempo Operación}) * 100.$$

Donde:

EL cálculo del tiempo por pérdida de velocidad:

- Producción Teórica = Caudal de Diseño ( $Q_{opt}$ ) × Tiempo de Operación
- Producción Real = Caudal Real Promedio ( $Q_{real}$ ) × Tiempo de Operación.

Por lo tanto:

Diferencia = Producción Teórica – Producción Real

- Tiempo por Pérdida de Velocidad = Diferencia / Caudal de Diseño ( $Q_{opt}$ )

En conclusión la fórmula para el tiempo neto para una planta de tratamiento de agua de mar es:

$$\textit{Tiempo Neto} = \textit{Tiempo de Operación} - \textit{Tiempo por perdida de velocidad}$$

La siguiente tabla resume los indicadores clave utilizados para calcular el tiempo neto y el rendimiento, especificando su propósito en el proceso y su definición aplicada al tratamiento de agua de mar.

Indicadores Según marco teórico	Objetivo en el proceso	Definición para el tratamiento de agua de mar.
Tiempo de Operación	Maximizar la disponibilidad real de los equipos.	Corresponde al tiempo efectivamente disponible para operar, resultante de descontar del Tiempo de Carga todas las interrupciones por mantenencias, fallas no planificadas, setups y eventos sin clasificación. Representa el período en que la planta puede tratar agua de mar bajo condiciones operativas estables.
Tiempo de perdidas por velocidad	Operar a velocidad nominal sin detenciones.	Corresponden a reducciones en el caudal de agua tratada por debajo del nominal, frecuentes en arranques o cierres, que pueden generar detenciones en líneas aguas arriba o niveles críticos en estanques de recepción del proceso minero.

*Tabla 3.- indicador, objetivo y definición del tiempo neto.*

Cálculo considerando agrupación de procesos.

El cálculo de indicadores operacionales aplicando filtros por línea de tratamiento, tren de ósmosis inversa, unidad funcional o planta completa. Al agrupar múltiples líneas, se suman los tiempos de operación y las pérdidas por velocidad de cada tren u operación específica, permitiendo obtener un cálculo consolidado y representativo del Tiempo Neto y del % de Rendimiento.

## D. Calidad.

### Tiempo Agregando Valor (TAV)

Corresponde al Tiempo Neto de operación, descontando el tiempo asociado a pérdidas por calidad del agua tratada. En una planta desaladora, esta pérdida se asocia a volúmenes de agua que no cumplen con los parámetros requeridos y que deben ser reprocesados o descartados.

## TIEMPO AGREGANDO VALOR

Tiempo Neto – Tiempo por Pérdidas de Calidad

Cálculo del tiempo por pérdida de calidad.

$$\text{Pérdida por Calidad (en tiempo)} = (\text{Volumen No Conforme}) / (\text{Caudal Estándar de Operación } (Q_{opt}))$$

- Volumen No Conforme: Agua tratada que no cumple especificaciones de calidad (por ejemplo, conductividad, cloro libre, turbidez).
- Caudal Estándar ( $Q_{opt}$ ): Caudal nominal de diseño de la planta, o del tren considerado (ejemplo: 3200 m<sup>3</sup>/h).

Ejemplo numérico:

- Volumen No Conforme: 6.400 m<sup>3</sup>
- Caudal Estándar ( $Q_{opt}$ ): 3.200 m<sup>3</sup>/h

Pérdida por Calidad=6400/3200=2 horas.

Es decir, la planta perdió 2 horas de valor agregado debido a producción de agua fuera de estándar o especificación.

La tabla siguiente sintetiza los indicadores necesarios para calcular el tiempo agregando valor, identificando su propósito operativo y su definición dentro del proceso de tratamiento de agua de mar. Estos elementos permiten evaluar el impacto de las pérdidas por calidad en el desempeño total de la planta.

Indicadores Según marco teórico	Objetivo en el proceso	Definición para el tratamiento de agua de mar.
---------------------------------------	------------------------	------------------------------------------------

Tiempo de neto	Mantener flujo continuo y eficiente.	Corresponde al tiempo efectivo de operación de la planta, una vez descontadas las pérdidas por bajo flujo, reflejando el periodo en que el sistema funcionó sin restricciones hidráulicas.
Pérdidas por Calidad (Lcalidad)	Evitar generación de producto no conforme.	Tiempos de detención para evitar agua de producción con defectos de calidad. Su tiempo corresponde al volumen de producto que pasaría sin cumplir con las especificaciones de calidad dividido por su flujo nominal. En esta tesina lo reemplazaremos por agua fuera de especificación según marco teórico.

*Tabla 4.- indicador, objetivo y definición del tiempo agregando valor.*

Entonces:

Relación con el OEE medido en tiempo:

$$OEE = (TAV / \text{Tiempo de Carga}) \times 100$$

Finalmente se puede expresarse como:



## 5.2. Definición de Cuadro de mando integral de indicadores

En el marco del modelo propuesto para la gestión del desempeño operacional, se diseña un Cuadro de Mando de Indicadores como herramienta central para el monitoreo, control y mejora continua de los procesos críticos. Este Cuadro de Mando se fundamenta en la metodología del Mapa Estratégico de Kaplan y Norton, abordada previamente en el Marco Teórico, la cual permite descomponer los objetivos estratégicos en cuatro perspectivas complementarias: Financiera, Cliente, Procesos Internos, y Aprendizaje y Conocimiento. Esta estructura metodológica garantiza una alineación coherente entre el rendimiento técnico de la planta desaladora, los requerimientos operacionales del proceso minero y los objetivos de eficiencia y sostenibilidad a nivel corporativo.

El Cuadro de Mando constituye un aporte concreto al conocimiento, al adaptar un marco estratégico internacionalmente validado a la realidad operativa de plantas desaladoras en la minería chilena. Su diseño integra indicadores claves directamente vinculados a variables operacionales críticas del proceso, tales como la calidad del agua tratada, los costos por incumplimiento de especificaciones, la disponibilidad técnica de equipos, la eficiencia del proceso global (OEE), la capacidad de respuesta ante contingencias, y la trazabilidad de la información. Cada uno de estos indicadores está asociado a metas específicas y funcionales, facilitando su uso práctico en el seguimiento periódico del desempeño, la comparación entre unidades productivas y la detección temprana de desviaciones que puedan afectar la continuidad o la eficiencia del suministro de agua.

La Tabla 5 resume este Cuadro de Mando de Indicadores, estructurado según las cuatro perspectivas estratégicas antes mencionadas. En ella se presentan los objetivos estratégicos definidos para cada perspectiva y sus respectivos indicadores asociados, cuya formulación responde a los desafíos reales de operación en plantas desaladoras industriales y se orienta a fortalecer la toma de decisiones basadas en evidencia. Este instrumento, además, se articula con el enfoque OEE y con los principios de mejora continua, permitiendo no solo observar el estado actual del desempeño operacional, sino también proyectar su evolución en función de escenarios conservadores, óptimos y de excelencia, en línea con estándares de clase mundial.

<b>Perspectiva</b>	<b>Objetivo Estratégico</b>	<b>Indicador Asociado</b>
<b>Financiera</b>	Reducir pérdidas económicas por agua fuera de especificación	Costo asociado a m <sup>3</sup> rechazados por fuera de especificación (\$/m <sup>3</sup> no conforme)
<b>Financiera</b>	Disminuir el costo de producción mediante mejora del OEE	Costo total de producción por m <sup>3</sup> × (Producción / Tiempo de Carga) × % de aumento OEE
<b>Cliente</b>	Garantizar cumplimiento de parámetros de calidad del agua tratada	% m <sup>3</sup> fuera de especificación / m <sup>3</sup> totales tratados
<b>Cliente</b>	Asegurar confiabilidad en el suministro continuo hacia procesos mineros	Nº de incidentes de calidad o cortes no programados reportados por el cliente

<b>Procesos Internos</b>	Mejorar el tiempo planificado de operación	Índice de Carga: Tiempo de Carga/ Tiempo Calendario
<b>Procesos Internos</b>	Aumentar la productividad por hora	Índice de productividad: M3/ Tiempo de Carga
<b>Procesos Internos</b>	Mejorar el rendimiento operativo de la planta desaladora	% Rendimiento (Tiempo Neto / Tiempo de Operación) – OEE (%)
<b>Procesos Internos</b>	Disminuir pérdida de Calidad	% Calidad: (Tiempo Agregando Valor) / (Tiempo Neto) *100
<b>Procesos Internos</b>	Incrementar la disponibilidad	Tiempo operación / Tiempo de Carga
<b>Procesos Internos</b>	Optimizar tiempos de respuesta ante fallas	Tiempo promedio de atención ante eventos críticos (minutos)
<b>Aprendizaje y Conocimiento</b>	Fortalecer competencias del equipo técnico y de mantenimiento	% de mantenedores capacitados – N° de certificaciones internas por semestre
<b>Aprendizaje y Conocimiento</b>	Mejorar trazabilidad de información y calidad de registros operacionales	Cumplimiento de protocolos de registro – Auditorías sin observaciones

Tabla 5.- cuadro de mando de indicadores.

### 5.3 Definición de metas de los indicadores de eficiencia

La definición de metas constituye un componente esencial dentro del sistema de gestión del desempeño operacional, ya que transforma el diagnóstico en dirección, permitiendo establecer objetivos concretos para la mejora continua. La formulación de metas asociadas a los indicadores del Cuadro de Mando Estratégico representa una etapa clave en la consolidación del sistema de gestión del desempeño operacional. Estas metas permiten visualizar los objetivos estratégicos definidos en cada una de las perspectivas del modelo de Kaplan y Norton, conectando la visión de largo plazo con el control táctico y operativo diario.

En el caso de una planta desaladora integrada a procesos mineros, la definición de metas debe considerar tanto la variabilidad operativa propia del entorno industrial, como los requerimientos críticos de continuidad y calidad en el suministro de agua tratada. Por ello, se han establecido metas que cumplen con los criterios SMART (Específicas, Medibles, Alcanzables, Realistas y Acotadas en el tiempo), y que reflejan un balance entre el desempeño histórico observado, la capacidad técnica instalada y las exigencias de mejora continua.

Cada indicador del cuadro de mando incluye una meta referencial y una frecuencia de medición, con el fin de habilitar el monitoreo periódico, la comparación entre unidades operativas y la detección temprana de desviaciones. Adicionalmente, algunas metas han sido definidas en términos porcentuales o absolutos, según la naturaleza del indicador (por ejemplo, tiempo de respuesta ante fallas, porcentaje de agua fuera de especificación, disponibilidad técnica o nivel de capacitación del personal).

En esta etapa se incorpora además el indicador compuesto OEE Ajustado (OEE-NA), que considera la disponibilidad, el rendimiento y la calidad, penalizando tanto las detenciones programadas como no programadas. Esta versión ajustada del OEE representa de mejor manera el desempeño operativo neto real de la planta, y permite orientar las metas hacia un uso más eficiente del tiempo calendario total disponible (por ejemplo, 168 horas semanales en operación continua). Su inclusión refuerza la visión integrada del desempeño, conectando el control táctico con los resultados estratégicos esperados.

La siguiente tabla presenta las metas referenciales y frecuencias de medición asociadas a los indicadores estratégicos del Cuadro de Mando:

<b>Perspectiva</b>	<b>Objetivo Estratégico</b>	<b>Indicador Asociado</b>	<b>Meta Referencial</b>	<b>Frecuencia de Medición</b>
<b>Financiera</b>	Reducir pérdidas económicas por agua fuera de especificación	Costo asociado a m <sup>3</sup> rechazados por fuera de especificación (\$/m <sup>3</sup> no conforme)	≤ 2% del costo semanal o ≤ 2 USD/m <sup>3</sup> no conforme	Semanal
<b>Financiera</b>	Disminuir el costo de producción mediante mejora del OEE	Costo total de producción por m <sup>3</sup> × (Producción / Tiempo de Carga) × % de aumento OEE	Ahorro ≥ 5% anual sobre el costo base por m <sup>3</sup> tratado	Mensual
<b>Cliente</b>	Garantizar cumplimiento de parámetros de calidad del agua tratada	% m <sup>3</sup> fuera de especificación / m <sup>3</sup> totales tratados	≤ 3% mensual	Diario
<b>Cliente</b>	Asegurar confiabilidad en el suministro continuo hacia procesos mineros	Nº de incidentes de calidad o cortes no programados reportados por el cliente	0 cortes no programados / ≤ 1 incidente por trimestre	Trimestral
<b>Procesos Internos</b>	Mejorar el tiempo planificado de operación	índice de Carga: Tiempo de Carga/ Tiempo Calendario	≥ 85% (valor razonable de carga efectiva sobre calendario)	Semanal
<b>Procesos Internos</b>	Aumentar la productividad por hora	índice de productividad: M3/ Tiempo de Carga	≥ 80% (como base para productividad efectiva)	Semanal
<b>Procesos Internos</b>	Mejorar la disponibilidad	Tiempo operación / Tiempo de Carga	≥ 95%	Semanal
<b>Procesos Internos</b>	Mejorar el rendimiento operativo de la planta desaladora	% Rendimiento (Tiempo Neto / Tiempo de Operación) – OEE (%)	Rendimiento ≥ 85% / OEE ≥ 75%	Semanal

<b>Procesos Internos</b>	Disminuir pérdida de Calidad	% Calidad: (Tiempo Agregando Valor)/ (Tiempo Neto)*100	≥ 90% (TAV/Net Time como indicador de calidad sostenida)	Semanal
<b>Procesos Internos</b>	Optimizar tiempos de respuesta ante fallas	Tiempo promedio de atención ante eventos críticos (minutos)	≤ 30 minutos desde la detección a la intervención operativa	Diario
<b>Aprendizaje y Conocimiento</b>	Fortalecer competencias del equipo técnico y de mantenimiento	% de mantenedores capacitados – N° de certificaciones internas por semestre	≥ 90% del personal crítico capacitado / ≥ 2 certificaciones internas por semestre	Semestral
<b>Aprendizaje y Conocimiento</b>	Mejorar trazabilidad de información y calidad de registros operacionales	Cumplimiento de protocolos de registro – Auditorías sin observaciones	≥ 95% de cumplimiento / ≥ 1 auditoría trimestral sin observaciones críticas	Trimestral

*Tabla 6.- metas referenciales y frecuencias de medición asociadas a los indicadores estratégicos del CMI.*

### 5.3.1 Justificación del Cálculo de Metas Referenciales y Frecuencia de Medición

#### 1. Financiera

##### **Costo asociado a m<sup>3</sup> rechazados por fuera de especificación**

cálculo teórico como referencia para justificar la meta del indicador "Costo asociado a m<sup>3</sup> rechazados por fuera de especificación", utilizando valores estimados que puedes ajustar si se cuenta con información real de una planta desaladora, en este caso de como ejemplo la siguiente tabla.

<b>Variable</b>	<b>Valor estimado</b>	<b>Unidad</b>
Producción semanal total	3200 m <sup>3</sup> /h × 24 h/día × 7 días	= 537.600 m <sup>3</sup> /semana
Meta de agua fuera de especificación	2% de la producción semanal	= 10.752 m <sup>3</sup>
Costo operacional unitario simulado.	1,50 USD/m <sup>3</sup>	
Pérdida económica estimada	10.752 m <sup>3</sup> × 1,50 USD	= 16.128 USD/semana

*Tabla 7.- costos asociados a m3 rechazados por fuera de especificación.*

Entonces si una planta desaladora operando 24 horas y 7 días con una capacidad de 3200 m<sup>3</sup>/h rechaza un 2% del volumen tratado por problemas de calidad, esto se traduce en una pérdida estimada de 16.128 USD por semana.

Frecuencia (Semanal): Permite evaluar rápidamente el impacto económico de pérdidas, ajustando procesos de control de calidad en ciclos cortos.

##### **Costo total de producción por m<sup>3</sup> × (Producción / Tiempo de Carga) × % aumento OEE**

Meta referencial (Ahorro ≥ 5%): Se estiman la reducción de costos al mejorar el OEE en un 5%, con foco en caudal efectivo, rendimiento y disminución de fallas.

<b>Variable</b>	<b>Valor utilizado</b>	<b>Justificación</b>
Horas de operación mensual	24 h/día × 30 días = 720 h/mes	Planta operando todos los días del mes, sin interrupciones

Caudal nominal (Q <sub>opt</sub> )	3200 m <sup>3</sup> /h	Diseño típico de plantas desaladoras industriales
Producción teórica mensual	3200 × 720 = 2.304.000 m <sup>3</sup> /mes	Máxima producción posible bajo operación continua

*Tabla 8.- Costos de producción tratamiento de agua de mar.*

Por lo tanto, los cálculos de:

- Producción real con OEE del 70% (1.612.800 m<sup>3</sup>)
- Producción real con OEE del 75% (1.728.000 m<sup>3</sup>)
- Diferencia de producción: 115.200 m<sup>3</sup>
- Ahorro estimado a 1,50 USD/m<sup>3</sup>: 172.800 USD/mes

Estos cálculos basados en una planta que no detiene su operación (24/7).

Frecuencia (Mensual): Permite observar tendencias operativas sostenidas, asociadas a mejoras estructurales en eficiencia.

### **Ciente.**

Se definieron dos indicadores críticos: el porcentaje de agua fuera de especificación y la frecuencia de incidentes reportados por los usuarios. En ambos casos, se utilizaron ejemplos la industria sobre una planta que opera 24/7 con una capacidad de 3200 m<sup>3</sup>/h. Se determinó que mantener el agua fuera de especificación por debajo del 3% semanal (equivalente a 16.128 m<sup>3</sup>) asegura la calidad exigida por procesos mineros sensibles. Por otro lado, se fijó como meta no superar 1 incidente de calidad o corte de suministro por trimestre, considerando la alta dependencia de los procesos industriales de la disponibilidad de agua tratada en condiciones estables.

### **% m<sup>3</sup> fuera de especificación / m<sup>3</sup> totales tratados**

Meta referencial (≤ 3%): Definida como límite técnico operacional que permite mantener la calidad del agua de acuerdo con los requisitos contractuales del cliente interno (procesos mineros).

Cálculo de Meta referencial: ≤ 3%

Donde el cálculo teórico con planta operando 24/7

Producción total semanal:

$$3200 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h/día} \times 7 \text{ días} = 537.600 \text{ m}^3/\text{semana}$$

Meta de rechazo técnico permitido:

$$537.600 \times 0,03 = 16.128 \text{ m}^3/\text{semana}$$

Esto significa que, bajo la meta del 3%, se tolera hasta 16.128 m<sup>3</sup> por semana de agua fuera de especificación.

Justificación técnica:

El 3% se establece como límite operacional aceptable para plantas bien controladas.

Considera tolerancias en sistemas de desinfección, limpieza de membranas, variabilidad en agua cruda marina, o transitorios en arranques. Mantenerse por debajo de ese umbral asegura cumplimiento con los estándares internos de calidad del agua para procesos mineros sensibles, como lixiviación o enfriamiento.

### **N° de incidentes de calidad o cortes no programados reportados por el cliente**

Una planta de tratamiento de agua de mar operando 24/7, que abastece a procesos mineros críticos (como sistemas de enfriamiento, flotación, o alimentación de calderas), cualquier corte no programado o incidente de calidad puede comprometer directamente la continuidad operacional, generando impactos económicos, contractuales y ambientales.

Ejemplo de cálculo (planta 24/7):

- Total de horas operativas por trimestre (90 días):

90 días×24 h/día=2.160 h

Si se tolera solo 1 incidente por trimestre, se establece un estándar de confiabilidad muy alto:

1 incidente / 2.160 h=0,046 incidentes por 100 horas.

Este valor corresponde a un índice de alta disponibilidad, acorde con las exigencias de servicio continuo en minería.

Frecuencia (Trimestral):

Esta periodicidad coincide con los ciclos formales de reporte operativo hacia el cliente, integrándose en auditorías, revisiones contractuales o comités de desempeño. La frecuencia trimestral permite evaluar tendencias estructurales, sin sobre reaccionar ante eventos aislados pero sin dejar de registrar su impacto.

### **3. Procesos Internos**

#### **índice de Carga: Tiempo de Carga/ Tiempo Calendario**

Ejemplo de cálculo:

Para una planta operando 24/7:

Tiempo calendario semanal = 168 horas (24 h/día × 7 días)

Meta de carga planificada: ≥ 85%

Tiempo mínimo a planificar: 168 h × 0,85 = **142,8 horas**

Esto significa que, como mínimo, cada semana deben estar planificadas 143 horas en actividades operativas, y no más de 25 horas pueden quedar sin programación efectiva (por ejemplo, tiempos ociosos sin justificación, retrasos en instrucciones de trabajo o espera de decisiones operativas).

El estándar del 85% se considera un umbral aceptable en plantas de operación continua con múltiples trenes o equipos redundantes.

Deja margen razonable para contingencias no planificadas, como mantenimientos correctivos menores o paradas no críticas.

Mejora la eficiencia operativa al fomentar la anticipación de recursos, materiales y personal.

Frecuencia Semanal:

Permite evaluar la calidad de la planificación operativa con base en turnos o ciclos cortos.

Detecta desviaciones tempranas para acciones correctivas, evitando acumulación de ineficiencias.

### **índice de productividad: M3/ Tiempo de Carga**

Justificación según Cálculo de Referencia con Planta Estándar (3200 m<sup>3</sup>/h):

Producción teórica máxima por hora: 3200 m<sup>3</sup>/h

Si tenemos en una hora efectiva de carga, y se logran tratar  $\geq 2560$  m<sup>3</sup>

Esto representa el 80% de la capacidad nominal:

$$(2560/3200) \times 100 = 80\%$$

Este umbral permite absorber pérdidas menores por ajustes de caudal, cambios de trenes (rack), o control de calidad sin comprometer el rendimiento general.

Corresponde a un estándar de productividad efectiva, donde al menos 4/5 del tiempo planificado se traduce en producción útil.

En plantas de tratamiento de agua de mar, mantener una productividad  $\geq 80\%$  refleja un nivel saludable de eficiencia operativa con margen de maniobra.

Frecuencia:

Un análisis semanal permite observar tendencias en la operación y ajustar rápidamente variables como caudal, presión, o secuencias de operación.

## **Disponibilidad: Tiempo operación / Tiempo de Carga**

Este indicador refleja la proporción del tiempo efectivamente utilizado respecto al tiempo planificado. En plantas que operan 24/7 con procesos críticos como la desalación, una disponibilidad  $\geq 95\%$  representa un estándar alto, pero alcanzable, considerando márgenes por limpieza de membranas, variaciones de caudal o mantenimiento correctivo menor.

Se basa en un modelo de continuidad operacional con tiempos de parada minimizados.

El 5% restante permite tolerar ajustes, transiciones o contingencias menores.

Ejemplo de cálculo:

Si en una semana de operación continua:

- Tiempo de Carga= 7días× 24 h= 168 horas

Entonces el equipo operó 160 horas efectivas:

- Disponibilidad=  $(160/168) \times 100 \approx 95,24\%$

Este valor cumple con la meta establecida, indicando que el sistema estuvo disponible casi todo el tiempo planificado.

Medición semanal permite actuar con rapidez ante desviaciones recurrentes, asegurando una operación estable.

## **% Rendimiento (Tiempo Neto / Tiempo de Operación) – OEE (%)**

Un rendimiento del 85% implica que solo un 15% del tiempo operativo se pierde por causas como baja velocidad, ajustes de caudal o fluctuaciones.

Un OEE  $\geq 75\%$  representa una eficiencia global sobresaliente para operaciones complejas.

Estos valores fueron definidos considerando análisis comparativos con benchmarks de la industria de desempeño en ciclos mensuales de 720 horas.

Ejemplo de cálculo:

Supongamos una planta que opera 720 h/mes:

- Tiempo de operación: 700 h
- Tiempo neto (sin pérdidas por velocidad): 595 h

% Rendimiento:

$$(595/700) \times 100 = 85\%$$

Medición semanal permite vincular eficiencia con decisiones tácticas del turno y gestionar mejoras rápidas.

## **% Calidad: (Tiempo Agregando Valor)/ (Tiempo Neto)\*100**

Este indicador refleja la proporción del tiempo neto en que la producción cumple con especificaciones de calidad.

Un valor  $\geq 90\%$  significa que solo un 10% del tiempo neto se pierde por reprocesos, rechazos o ajustes por parámetros fuera de norma (como cloro libre, conductividad o ORP).

Tiempo Neto mensual estimado:

Corresponde al tiempo total durante el cual la planta estuvo operando efectivamente (sin contar paradas).

Se estima en 700 horas al mes.

TAV (Tiempo Agregando Valor):

Es el tiempo dentro del Tiempo Neto en el que el agua producida cumplió todos los parámetros de calidad exigidos.

En este caso, fue de 630 horas.

Aplicación de la fórmula:

$$\% \text{Calidad} = (\text{TAV} / \text{Tiempo Neto}) \times 100$$

$$\% \text{Calidad} = (630 / 700) \times 100 = 90\%$$

Interpretación del resultado:

El 90% del tiempo operativo efectivo se utilizó para producir agua dentro de especificaciones.

El 10% restante representa tiempo perdido por problemas de calidad (reprocesos, ajustes, rechazos).

Esto refleja un buen estándar operacional, especialmente en una planta donde mantener la calidad minimiza riesgos contractuales y costos operativos adicionales.

Frecuencia semanal permite detectar desviaciones antes de que se acumulen pérdidas significativas.

## **Tiempo promedio de atención ante eventos críticos**

Meta referencial:  $\leq 30$  minutos

Ejemplo de cálculo:

- Supón 10 eventos críticos diarios
- Tiempo total de atención objetivo =  $10 \times 30 = 300$  minutos/día

Esta meta es coherente con un modelo de mantenimiento correctivo reactivo, donde la capacidad de reacción es esencial para evitar pérdidas de producción o daños en cadena.

Frecuencia:

Diaria, ya que su naturaleza correctiva exige monitoreo inmediato.

### **Aprendizaje y Conocimiento**

#### **% de mantenedores capacitados – N° de certificaciones**

Meta referencial:

- $\geq 90\%$  de mantenedores capacitados
- $\geq 2$  certificaciones por semestre

En plantas de tratamiento con alta dependencia de tecnologías específicas (ósmosis inversa, instrumentación digital), al menos 9 de cada 10 técnicos deben dominar los sistemas. Las certificaciones semestrales aseguran actualización técnica periódica (programas internos, fabricantes, normativa sanitaria).

Frecuencia:

Semestral, alineado con calendarios de formación técnica y evaluación de desempeño del personal.

#### **Cumplimiento de protocolos – Auditorías sin observaciones**

Meta referencial:

- $\geq 95\%$  de cumplimiento documental
- $\geq 1$  auditoría trimestral sin observaciones críticas

Basado en normativas ISO 9001, ISO 14001 y auditorías de procesos críticos (calidad del agua, mantenimiento, trazabilidad), donde se exige excelencia documental y cumplimiento de protocolos.

Frecuencia:

Trimestral, ya que permite análisis de tendencias, cumplimiento normativo y mejora continua en gestión documental y operación segura.

En síntesis, la definición de metas asociadas a los indicadores del Cuadro de Mando no solo permite traducir los objetivos estratégicos en parámetros operativos concretos, sino que constituye un pilar fundamental para gestionar con eficiencia los recursos, responder proactivamente ante desviaciones y sostener mejoras continuas en el tiempo. En el contexto,

donde las plantas desaladoras operan bajo altos niveles de exigencia técnica, normativa y ambiental, la incorporación de metas claras, medibles y realistas alineadas a estándares de clase mundial contribuye directamente a garantizar la continuidad operacional, optimizar costos y fortalecer la confiabilidad del suministro de agua tratada. Este enfoque refuerza la aplicabilidad del modelo propuesto.

#### 5.4 Gestión de la eficiencia operacional

La gestión de la eficiencia operacional requiere un enfoque integrado que permita monitorear, evaluar y controlar de manera continua las variables críticas que influyen en el desempeño técnico y estratégico de la operación. Para ello, se definen indicadores clave de desempeño (KPIs) que permiten cuantificar aspectos fundamentales como el costo por agua no conforme, el rendimiento hidráulico, la disponibilidad técnica de los equipos, los tiempos de respuesta ante fallas y la formación del personal técnico. Estos indicadores son consolidados dentro de un Cuadro de Mando Integral (CMI), lo cual facilita su alineación con los objetivos estratégicos de la organización y promueve la toma de decisiones basada en evidencia operativa.

La siguiente tabla presenta los KPIs seleccionados, junto con sus metas referenciales, la frecuencia de medición y los responsables del seguimiento presentado en la definición de metas de los indicadores de eficiencia. Además, se incorporan las columnas de meta real, desviación, brechas y plan de acción, permitiendo visualizar el estado actual del desempeño operacional y tomar decisiones correctivas de forma oportuna. Esta estructura facilita la trazabilidad entre los objetivos estratégicos y los resultados reales de la operación, funcionando como una herramienta de gestión práctica, dinámica y orientada a la mejora continua.

Indicador Asociado	Meta Referencial	Frecuencia de Medición	Responsable	Meta real	Desviación	brechas	Plan de acción
Costo asociado a m <sup>3</sup> rechazados por fuera de especificación (\$/m <sup>3</sup> no conforme)	≤ 2% del costo semanal o ≤ 2 USD/m <sup>3</sup> no conforme	Semanal	Gerente o superintendente de operaciones				
Costo total de producción por m <sup>3</sup> × (Producción / Tiempo de Carga) × % de aumento OEE	Ahorro ≥ 5% anual sobre el costo base por m <sup>3</sup> tratado	Mensual	Gerente o superintendente de operaciones				

% m <sup>3</sup> fuera de especificación / m <sup>3</sup> totales tratados	≤ 3% mensual	Diario	Gerente o superintendente de operaciones				
Nº de incidentes de calidad o cortes no programados reportados por el cliente	0 cortes no programados / ≤ 1 incidente por trimestre	Trimestral	Toda la Organización				
Índice de Carga: Tiempo de Carga/ Tiempo Calendario	≥ 85% (valor razonable de carga efectiva sobre calendario)	Semanal	Gerente o superintendente de operaciones				
Índice de productividad: M3/ Tiempo de Carga	≥ 80% (como base para productividad efectiva)	Semanal	Gerente o superintendente de operaciones				
Tiempo operación / Tiempo de Carga	≥ 95% (alta disponibilidad técnica asociada a operación continua)	Semanal	Gerente o superintendente de mantención				
% Rendimiento (Tiempo Neto / Tiempo de Operación) – OEE (%)	Rendimiento ≥ 85% / OEE ≥ 75%	Semanal	Gerente o superintendente de operaciones				
% Calidad: (Tiempo Agregando Valor)/ (Tiempo Neto)*100	≥ 90% (TAV/Net Time como indicador de calidad sostenida)	Semanal	Gerente o superintendente de operaciones				
Tiempo promedio de atención ante eventos	≤ 30 minutos desde la detección a la	Diario	Gerente o superintendente de mantención				

críticos (minutos)	intervención operativa						
% de mantenedores capacitados – N° de certificaciones internas por semestre	≥ 90% del personal crítico capacitado / ≥ 2 certificaciones internas por semestre	Semestral	Gerente o superintendente de mantención				
Cumplimiento de protocolos de registro – Auditorías sin observaciones	≥ 95% de cumplimiento / ≥ 1 auditoría trimestral sin observaciones críticas	Trimestral	Gerente o superintendente de operaciones				

Tabla 9.- Gestión de eficiencia operacional.

La siguiente tabla actúa como una guía práctica para visualizar el estado actual del desempeño operacional. A través de ella, se puede identificar rápidamente si los resultados están dentro de lo esperado o si existen desviaciones que requieren atención inmediata. Cada fila representa un KPI crítico, donde se comparan las metas referenciales con los valores reales obtenidos, se identifican las brechas detectadas, y se detallan los planes de acción definidos para cerrar dichas brechas.

La definición de las columnas es:

- Meta Real: muestra el valor que realmente se alcanzó durante el periodo evaluado.
- Desviación: indica cuánto se aleja el resultado de la meta esperada.
- Brechas: analiza las causas operacionales y/o de mantención que explican esa desviación.
- Plan de acción: describe las medidas específicas a implementar para corregir o prevenir el problema identificado.

Meta real	Desviación	brechas	Plan de acción
2,5 USD/m <sup>3</sup>	+0,5 USD/m <sup>3</sup>	Control débil en parámetros de rechazo de calidad	Refuerzo en controles de calidad y automatización del rechazo

3% ahorro	-2% ahorro	Falta de optimización en tiempos de carga y eficiencia operativa	Ajustar turnos y aplicar plan de mantenimiento preventivo
4,2%	1,2%	Fallas en control de calidad en línea y monitoreo	Mejorar muestreo en línea y ajustes de dosificación
2 incidentes	+1 incidente	Inconsistencias en procedimientos de operación	Capacitación y simulacros para protocolos de respuesta
83%	-2%	Tiempos muertos no planificados por cambio de turno o baja coordinación	Revisión de planificación diaria y coordinación operativa entre turnos
78%	-2%	Velocidades de operación subóptimas y tiempo de carga extendido	Optimizar parámetros de operación por turno y capacitar sobre carga eficiente
Disponibilidad 89% / MTBF 120 h / MTTR 6 h	-3% / -40 h / +2 h	Altas tasas de fallas y mantenimientos correctivos diferidos	Campaña intensiva de mantenimiento y gestión de repuestos
Rendimiento 80% / OEE 70%	-5% / -5%	Bajas tasas de eficiencia en velocidad y disponibilidad	Análisis de pérdidas operativas y plan de eficiencia semanal
88%	-2%	Variaciones en dosificación y parámetros de proceso	Revisión de rutina de parámetros y ajuste de setpoints de calidad
42 minutos	+12 minutos	Tiempo excesivo en la activación de respuesta a eventos críticos	Instalación de alertas inteligentes y protocolo de reacción inmediata
75% capacitado / 1 certificación	-15% / -1 certificación	Cobertura insuficiente de programas de formación técnica	Implementar programa de formación técnica con evaluación interna
90% / 1 auditoría con observaciones	-5% / auditoría con observaciones	Débil cumplimiento en trazabilidad y evidencias operativas	Auditorías internas periódicas y formación en normativas

*Tabla 10.- Guía práctica para visualizar el estado actual del desempeño operacional.*

### 5.4.1 Incorporación del OEE Ajustado (OEE-NA) como Indicador Principal

Con el objetivo de reforzar la visión integral del desempeño operacional en una planta desaladora integrada a procesos mineros, se propone la incorporación del OEE Ajustado (OEE-NA) como indicador principal consolidado dentro del sistema de metas del Cuadro de Mando Estratégico.

A diferencia del OEE tradicional, que mide la eficiencia a partir de tres componentes (disponibilidad, rendimiento y calidad), el OEE-NA incluye todas las detenciones, tanto programadas como no programadas, proporcionando así una visión más realista del desempeño operativo neto. Este enfoque penaliza cualquier tipo de inactividad, y refleja de manera más precisa el impacto real de las interrupciones en la continuidad de proceso.

La fórmula utilizada es:

$$\text{OEE-NA} = \text{Disponibilidad Real} \times \text{Rendimiento} \times \text{Calidad}$$

Donde:

- Disponibilidad Real considera todo el calendario operativo (24/7), incluyendo mantenimientos programados, limpiezas, esperas y detenciones forzadas.
- Rendimiento evalúa la velocidad efectiva versus la velocidad ideal.
- Calidad mide el porcentaje del tiempo neto en que se produce agua conforme a especificación.

El OEE-NA se integra como un indicador sintético clave, ya que resume múltiples variables críticas y permite comparar el desempeño entre turnos, semanas o distintas unidades operativas, facilitando decisiones tácticas basadas en datos.

Según la meta real del CMI En este caso sería:

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

$$\text{OEE-NA} = 0,89 \times 0,80 \times 0,88$$

$$\text{OEE-NA} = 0,62656 \approx 62,8\%$$

El sistema opera con una eficiencia del 62,8% respecto al tiempo total planificado, considerando:

- Detenciones (disponibilidad),
- Velocidad reducida (rendimiento),
- Y pérdida de calidad (reprocesos o rechazos).

Esto quiere decir que, De las 168 horas disponibles por semana, con un OEE-NA de 62,8%, la planta:

- Aprovecha efectivamente: 105,5 horas
- Pierde por detenciones, velocidad y calidad:  $168 - 105,5 = 62,5$  horas/semana

#### 5.4.2 Aplicación de la metodología de gestión del desempeño para la mitigación de fallas

La implementación de la metodología desarrollada en esta tesina permite abordar de manera estructurada y alineada con la planificación estratégica los principales factores que inciden en el desempeño técnico-operacional de las plantas desaladoras. Mediante el uso integrado de indicadores clave como el OEE, la disponibilidad técnica, el MTBF y el MTTR, fue posible identificar actividades críticas que requieren fortalecimiento, monitoreo riguroso y gestión sistemática para asegurar una operación continua, eficiente y confiable.

Estas acciones se articulan bajo la perspectiva de Procesos Internos del Cuadro de Mando Integral (CMI), lo que permite vincular las decisiones técnicas con los objetivos estratégicos de productividad, continuidad operacional y sostenibilidad del proceso minero. En este marco, se priorizan intervenciones orientadas a disminuir las fallas no planificadas, mejorar el rendimiento hidráulico del sistema y reducir los tiempos de respuesta ante eventos críticos, promoviendo una cultura organizacional basada en la mejora continua y la gestión por evidencia.

Como referencia práctica, se presenta el siguiente modelo ilustrativo (ver tabla completa Anexo 2), que resume los objetivos estratégicos definidos para esta perspectiva del CMI, junto con los indicadores operacionales correspondientes, sus metas referenciales y las frecuencias de monitoreo recomendadas. Esta estructura puede adaptarse según la realidad de cada planta, sirviendo como base para implementar un sistema de control de desempeño técnico más eficaz:

Perspectiva	Objetivo Estratégico	Indicador Asociado	Meta Referencial	Frecuencia de Medición	Responsable	Meta real	Desviación	brechas	Plan de acción
Procesos Internos	Mejorar la disponibilidad	Tiempo operación / Tiempo de Carga	≥ 95% (alta disponibilidad técnica asociada a operación continua)	Semanal	Gerente o superintendente de mantención	Disponibilidad 89% / MTBF 120 h / MTTR 6 h	-3% / -40 h / +2 h	Altas tasas de fallas y mantenimientos correctivos diferidos	Campaña intensiva de mantenimiento y gestión de repuestos
Procesos Internos	Optimizar tiempos de respuesta ante fallas	Tiempo promedio de atención ante eventos críticos (minutos)	≤ 30 minutos desde la detección a la intervención operativa	Diario	Gerente o superintendente de mantención	42 minutos	+12 minutos	Tiempo excesivo en la activación de respuesta a eventos críticos	Instalación de alertas inteligentes y protocolo de reacción inmediata
Aprendizaje y Conocimiento	Fortalecer competencias del equipo técnico y de mantenimiento	% de mantenedores capacitados – Nº de certificaciones internas por semestre	≥ 90% del personal crítico capacitado / ≥ 2 certificaciones internas por semestre	Semestral	Gerente o superintendente de mantención	75% capacitado / 1 certificación	-15% / -1 certificación	Cobertura insuficiente de programas de formación técnica	Implementar programa de formación técnica con evaluación interna

Tabla 11.- modelo ilustrativo para la gestión de los procesos internos.

En línea con estos objetivos, se identificaron cinco focos de intervención prioritaria. Estas áreas se presentan como actividades concretas de mejora, orientadas a reforzar los principales

indicadores de mantenimiento y confiabilidad, asegurando su coherencia con la estrategia general propuesta.

### 1. Fortalecimiento de planes de bloqueo y control de energías peligrosas

Se identifica una brecha recurrente en el control efectivo de los tiempos de bloqueo de equipos, lo que genera riesgos operacionales y tiempos improductivos no planificados. Para abordarlo se propone:

- Actualizar y/o estandarizar procedimientos LOTO (Lock Out – Tag Out) para cada equipo crítico.
- Incorporar registros digitales y trazables del inicio y cierre de bloqueos.
- Capacitar periódicamente al personal de mantenimiento y operación en prácticas seguras sobre el bloqueo de los equipos.

### 2. Gestión documental de procedimientos técnicos

La efectividad del mantenimiento depende de contar con documentación técnica precisa, actualizada y disponible en terreno. Por ello se sugiere:

- Corregir y actualizar procedimientos obsoletos o inexistentes.
- Digitalizar y vincular documentos técnicos con los activos críticos.
- Establecer ciclos de revisión documental junto a supervisores y especialistas.

### 3. Control de fallas y trazabilidad de cambios de componentes

La gestión de fallas debe enfocarse no solo en la reacción ante eventos correctivos, sino en su análisis y trazabilidad. Se detectan oportunidades de mejora en:

- Registro incompleto de causas raíz (RCA).
- Documentar cada cambio de componente con orden de trabajo y evidencia técnica.
- Relacionar fallas con los KPI de MTBF y MTTR, revisándolos mensualmente.

### 4. Estandarización y cierre efectivo de órdenes de trabajo (OT)

El sistema de gestión de mantenimiento requiere una administración eficiente de las órdenes de trabajo. Las brechas identificadas incluyen:

- Digitalizar las OT con vinculación directa al historial del activo afectado.
- Definir criterios de prioridad y tiempos de ejecución según criticidad.
- Implementar dashboards para seguimiento semanal y revisión cruzada con operaciones.

## 5. Gestión de repuestos críticos

El suministro y disponibilidad de repuestos críticos impacta directamente en la capacidad de respuesta ante fallas. Las brechas observadas incluyen:

- Construir una matriz de criticidad de repuestos por sistema o equipo.
- Integrar el stock en tiempo real con el consumo operativo.
- Establecer alertas preventivas y generar informes de revisión mensuales con el área de abastecimiento.

La implementación de estas acciones no solo permite enfrentar de manera estructurada las principales causas de fallas en plantas, sino que además fortalece la integración entre mantenimiento, operación y gestión estratégica. Al centrarse en indicadores claves y datos reales de operación, la metodología propuesta se transforma en una herramienta práctica para mejorar la eficiencia, reducir riesgos y asegurar la continuidad operativa.

### **5.4.3 Herramientas para identificación de brechas sobre fallas**

La identificación sistemática de brechas constituye un componente esencial en la gestión de la eficiencia operacional, ya que permite detectar desviaciones respecto al desempeño técnico esperado y priorizar intervenciones destinadas a reducir pérdidas, fallas recurrentes y tiempos de inactividad no planificados. Este proceso no solo contribuye a mantener la continuidad operativa, sino que también refuerza la toma de decisiones basada en evidencia y la focalización de recursos en los puntos de mayor impacto.

Para ello, se propone el uso de herramientas visuales y analíticas que permiten caracterizar, cuantificar y jerarquizar las principales fuentes de pérdida en plantas de tratamiento de agua de mar. Estas herramientas complementan el seguimiento de indicadores clave como la disponibilidad técnica, el MTBF, el MTTR y el OEE, y actúan como un puente entre el diagnóstico técnico-operativo y la ejecución de mejoras concretas. En particular, se emplean dos herramientas clave: el Gráfico de Pareto y el Gráfico Jack Knife, las cuales se describen a continuación con ejemplos de aplicación práctica y su vínculo directo con la mitigación de fallas críticas en contextos industriales complejos.

### 5.4.3.1 Gráfico de Pareto

El Gráfico de Pareto es una herramienta fundamental para la identificación y priorización de las principales brechas operacionales. Su utilización permite focalizar los esfuerzos de mejora continua en aquellas variables que tienen mayor impacto sobre los indicadores críticos de eficiencia, como el OEE, el MTBF, el tiempo útil o el caudal efectivo.

Este gráfico clasifica y ordena las pérdidas o fallas según su impacto acumulado, visualizando claramente el principio 80/20: el 20% de las causas explica el 80% de las pérdidas. En el contexto de una planta desaladora en la industria minera, estas causas suelen estar asociadas a fallas repetitivas en bombas de alta presión, variabilidad en la calidad del agua de mar, sobrecarga en sistemas de pretratamiento y deficiencias en la gestión del mantenimiento.

Aplicación práctica:

Al realizar un análisis mensual de pérdidas operacionales y representarlas en un gráfico de Pareto, se facilita la identificación de los puntos críticos o "nodos principales desviados", los cuales deben ser tratados mediante equipos de mejora estructurados y planes de acción priorizados.

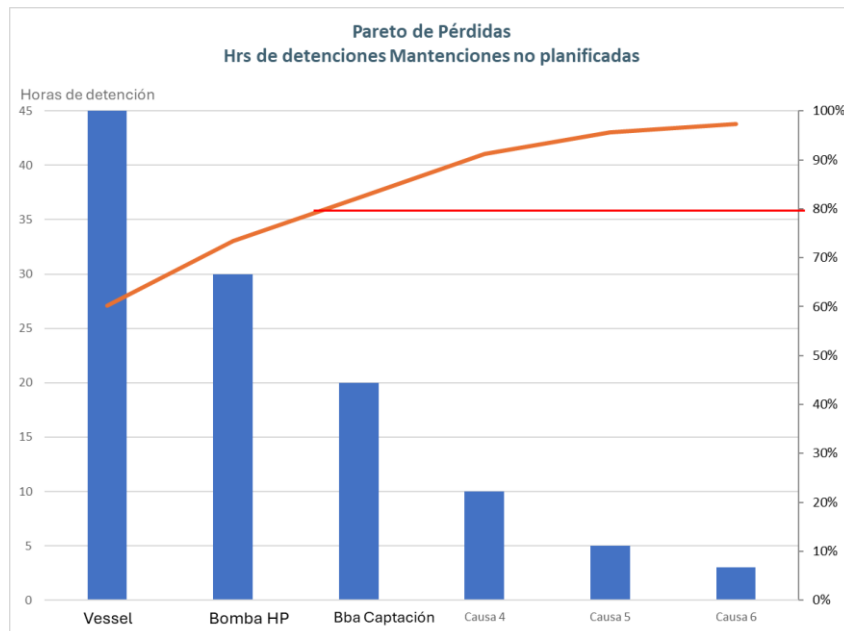


Ilustración 12.- Grafico del Modelo para el grafico de Pareto

### 5.4.3.2 Gráfico de Jack Knife

El Gráfico Jack Knife, también conocido como gráfico de dispersión logarítmico, es una herramienta visual clave en la gestión del mantenimiento, utilizada para priorizar áreas de inactividad operativa que requieren intervención inmediata. Su principal objetivo es identificar fallas críticas y recurrentes, permitiendo enfocar los esfuerzos técnicos y de planificación hacia las causas con mayor impacto en la disponibilidad y eficiencia de los activos.

Desde una base metodológica, el gráfico representa en su eje X el número de intervenciones o frecuencia de falla ( $n$ ), y en el eje Y el tiempo medio de reparación (MTTR). Ambos ejes están en escala logarítmica, lo que permite una mejor visualización de la dispersión de datos. Dentro del gráfico, una recta descendente de pendiente negativa unitaria ( $-1$ ) conecta todos los puntos con igual tiempo total de inactividad ( $n \times \text{MTTR}$ ). Cuanto más alejado del origen se ubique un punto sobre esa recta, mayor será el tiempo total perdido asociado a esa causa.

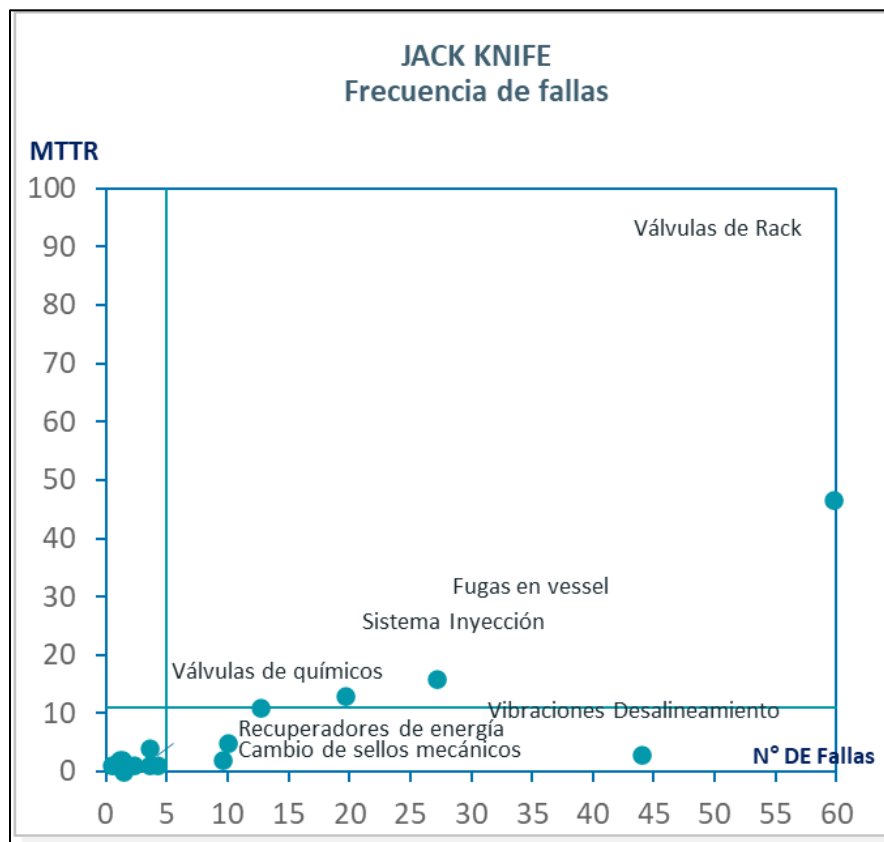


Ilustración 13.- Gráfico Modelo de gráfico de JackKnife.

Este enfoque posibilita una clasificación visual de las fallas no planificadas en cuatro cuadrantes de criticidad, definidos por valores límite para frecuencia y MTTR:

1. Cuadrante superior derecho – Fallas Críticas (Agudas + Crónicas):

Equipos que fallan con alta frecuencia y además tienen largos tiempos de reparación. Representan el mayor impacto sobre la operación y deben ser priorizados en análisis de causa raíz y planes de mejora estructural.

2. Cuadrante inferior derecho – Fallas Crónicas:

Alta frecuencia con bajo MTTR. Aunque su reparación es rápida, el volumen de ocurrencias genera un efecto acumulativo considerable. Requieren intervenciones en diseño, capacitación u operación para reducir su repetición.

3. Cuadrante superior izquierdo – Fallas Agudas:

Baja frecuencia, pero cuando ocurren, generan paradas extensas. Son típicas de equipos críticos y deben abordarse mediante mantenimiento predictivo, gestión de repuestos estratégicos y revisiones periódicas.

4. Cuadrante inferior izquierdo – Fallas Tolerables o de bajo impacto:

Baja frecuencia y bajo impacto. Estas fallas pueden ser tratadas con estrategias de control estándar, sin intervención prioritaria.

La aplicación práctica de esta metodología permite transformar datos operacionales dispersos en acciones concretas y estructuradas. Al integrar indicadores como la disponibilidad técnica, el MTBF y el MTTR con herramientas analíticas como el Pareto y el Jack Knife, se fortalece la capacidad de respuesta ante fallas, se identifican patrones ocultos y se priorizan intervenciones sobre los activos más críticos. Esta trazabilidad técnica-operativa permite a los equipos de mantenimiento y operación actuar con mayor enfoque, reduciendo pérdidas y mejorando el rendimiento integral de la planta.

Además, esta propuesta no solo se limita al control reactivo de fallas, sino que promueve una gestión proactiva, basada en evidencia y orientada a la prevención. La sistematización de procedimientos técnicos, la trazabilidad de órdenes de trabajo y la gestión de repuestos críticos constituyen pilares esenciales para sostener una mejora continua. Cada actividad planteada contribuye al fortalecimiento de una cultura operativa basada en estándares, buenas prácticas y monitoreo constante de desviaciones respecto a los objetivos estratégicos.

En definitiva, la metodología aplicada demuestra ser una herramienta eficaz para cerrar brechas estructurales que afectan la eficiencia operacional en plantas de tratamiento de agua de mar en la industria minera. Su implementación práctica, acompañada de un seguimiento riguroso de KPIs y análisis visuales, permite avanzar hacia operaciones más seguras, eficientes y resilientes frente a los desafíos del entorno productivo.

## 6.- CONCLUSIONES

El presente trabajo ha desarrollado una propuesta metodológica robusta, basada en evidencia técnica y operativa, orientada a optimizar la gestión del desempeño en plantas de tratamiento de agua de mar en el contexto de la industria minera chilena. En un entorno marcado por la escasez hídrica, la alta exigencia en la continuidad operacional y rigurosos estándares de calidad del agua tratada, la integración de herramientas de análisis estratégico como el OEE (Eficiencia General de los Equipos), el Cuadro de Mando Integral (CMI) y el OEE Ajustado (OEE-NA), permite avanzar hacia una operación más eficiente, confiable y sustentable.

Uno de los principales aportes de esta tesina radica en la adaptación de modelos clásicos de eficiencia al funcionamiento real de plantas desaladoras que operan de forma continua (24/7), bajo condiciones técnicas exigentes. Se logró descomponer el tiempo productivo en unidades funcionales (tiempo de carga, operación, neto y útil), lo que permitió identificar con precisión las principales fuentes de pérdida. Asimismo, se integraron indicadores clave de mantenimiento como el MTBF y el MTTR, esenciales para evaluar la confiabilidad de los activos y la capacidad de respuesta ante fallas. Estas herramientas se complementan con análisis visuales como el gráfico de Pareto y el diagrama Jack Knife, que facilitan la priorización de acciones correctivas o preventivas.

Como elemento diferenciador, se incorporó el OEE Ajustado (OEE-NA) en la gestión de la eficiencia operacional, que penaliza tanto detenciones programadas como no programadas, ofreciendo una visión más estricta y realista del desempeño operacional neto. Este indicador refleja de forma integral el impacto de las interrupciones sobre la eficiencia global, siendo particularmente relevante en instalaciones críticas donde cada hora de inactividad representa pérdidas significativas. En el caso evaluado, el OEE-NA alcanzó un 62,8%, resultado de la interacción entre disponibilidad técnica, rendimiento operativo y calidad del agua tratada.

La metodología propuesta no solo permite monitorear de forma continua el desempeño técnico, sino que también establece un vínculo directo entre los objetivos estratégicos del negocio y la gestión operativa diaria. Se promueve una cultura de toma de decisiones basada en datos, con trazabilidad, retroalimentación constante y alineación entre áreas clave como operaciones, mantenimiento, planificación y gestión de activos. Además, el modelo es flexible y escalable, lo que facilita su implementación tanto en proyectos nuevos como en plantas en operación.

Finalmente, esta propuesta representa un aporte práctico y replicable para la industria minera nacional, al ofrecer una herramienta integral de control, análisis y mejora continua del desempeño operacional. Su aplicación no solo impacta positivamente en la eficiencia interna, sino que también fortalece una minería más resiliente, competitiva y comprometida con la sostenibilidad hídrica del país. Al incorporar indicadores con impacto económico cuantificable y alineados con los objetivos del negocio, se consolida un modelo que permite transitar desde una gestión reactiva hacia la excelencia operacional.

## 7.- BIBLIOGRAFIA

### **Bibliografía documentos.**

Adler, M. O. (2004). Producción y Operaciones. Ed. Macchi.

Arata, A. (2005). Manual de gestión de activos y mantenimiento. Santiago: RIL Editores.

Arata, A. (2013). Ingeniería de la confiabilidad. Santiago: RIL Editores.

Arata, A. Ingeniería y gestión de la confiabilidad operacional en plantas industriales.

Camino a la Excelencia. (2011). Adopción y adaptación del Kaizen en Chile. Santiago de Chile: Comunidad Kaizen Chile.

Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2004). El Cuadro de Mando Integral: The Balance Scorecard (3ª ed.). Barcelona: Gestión 2000.

Lean Management. (2010). La gestión competitiva por excelencia. Barcelona.

Rodríguez Salazar, N. C. Implementación del modelo operacional orientado a procesos. Editorial Académica Española.

Senge, P. (1990). La Quinta Disciplina. El arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje.

Cruelles Ruíz, J. A. (2010). Productividad industrial: métodos de trabajo, tiempos y su aplicación a la planificación y a la mejora continua. Marcombo.

### **Webgrafías.**

<https://www.iimch.cl/index.php/noticias2/actualidad/2000-escondida-inaugura-planta-desalinizadora-en-coloso>.

<https://cdn.netmin.cl/minex/27bc9397-9561-4ce0-9c2c-e8adcf6f29e6/1f14a16c-31f6-4240-a849-3b80f46c9768.pdf>

<https://www.cochilco.cl/web/informe-consumo-de-agua-en-la-mineria-del-cobre-ano-2023/>

[file:///C:/Users/cdiaz12/OneDrive%20-%20Teck%20Resources%20Limited/Escritorio/cochilco-proyeccion-de-consumo-de-agua-en-la-mineria-del-cobre-2017-2028\\_2826.pdf](file:///C:/Users/cdiaz12/OneDrive%20-%20Teck%20Resources%20Limited/Escritorio/cochilco-proyeccion-de-consumo-de-agua-en-la-mineria-del-cobre-2017-2028_2826.pdf)

<https://www.teck.com/noticias-es/historias/2023/agua-de-mar-desalinizada-una-nueva-era-para-la-miner%C3%ADa-en-tarapac%C3%A1>

<https://www.mch.cl/negocios-industria/informe-de-cochilco-revela-importante-avance-de-la-industria-minera-en-materia-hidrica/>



AÑO PUESTA EN MARCHA	PROPIETARIO	MINA	REGIÓN	ETAPA DE DESARROLLO	TIPO	CAPACIDAD DE DESALACIÓN (lts/seg)	CAPACIDAD USO AGUA DE MAR (lts/seg)	Longitud tuberías de transporte de agua (Km)
2023	ANTOFAGASTA MINERALS	Proyecto de Infraestructura Complementaria (INCO)	Coquimbo	En Ejecución	Nuevo	400	-	150
2025	LUNDIN MINING	Candelaria - Optimización y Continuidad Operacional	Atacama	Factibilidad - EIA en Evaluación	Ampliación	agrega 100	-	110
2024	ALXAR (COPEC)	Sierra Norte (ex Diego de Almagro)	Atacama	Factibilidad - EIA Aprobado	Nuevo	-	315	61
2023	TECK	Quebrada Blanca Hipógeno	Tarapacá	En ejecución	Nuevo	850 (potencial de 1.200)	-	165
2025	COLLAHUASI	Collahuasi	Tarapacá	Factibilidad - EIA Presentado	Nuevo	525 *	-	195
2024	CAPSTONE	Desarrollo Mantoverde (***)	Atacama	Construcción	Ampliación	agrega 260	-	42
2025	CODELCO-CHILE	Planta desaladora Distrito Norte	Antofagasta	Factibilidad - EIA Aprobado	Nuevo	1956	-	160
2024	Copper Bay	Playa Verde	Atacama	Factibilidad - EIA Aprobado	Nuevo	Sin información	Sin información	Sin información
2024	ANTOFAGASTA MINERALS	Desarrollo Minera Centinela - Fusión Etapa 1 y Etapa 2	Antofagasta	Factibilidad - EIA Aprobado	Distribución	-	1150**	145
2025	CAPSTONE	Santo Domingo (***)	Atacama	Factibilidad - EIA Aprobado	Nuevo	30	400	112
2027	Andes Iron	Dominga (Hierro)	Coquimbo	Factibilidad - EIA Presentado	Nuevo	495	-	26,4
<b>Hipotéticos</b>								
2027	ANTOFAGASTA MINERALS	Proyecto Adaptación Operacional	Coquimbo	Pre Factibilidad - Sin EIA	Ampliación	ampliar planta MLP +400	-	150
2025	Sociedad Minera El Águila	Costa Fuego (Ex Productora)	Atacama	Pre Factibilidad - Sin EIA	Nuevo	368	-	62
2028	GOLDCORP y TECK	Nueva Unión Fase 1	Atacama	Factibilidad - Sin EIA	Nuevo	700	-	90
2025	Coro Mining	Proyecto Marimaca	Antofagasta	Pre Factibilidad - Sin EIA	Nuevo	Sin información	100	25
2029	FREEPORT McMORAN	El Abra Mill Project	Antofagasta	Factibilidad - Sin EIA	Nuevo	500	-	ND
ND	Compañía Minera Viscachitas Holding (CMVH) y Desala Petorca SPA	Proyecto Viscachitas	Valparaíso (Papudo)	Estudio de prefactibilidad (greenfield)	Nuevo	2050	-	ND
<b>Multiclientes</b>								
ND	Trends Industrial	ENAPAC (Energías y Aguas del Pacífico).	Atacama	Factibilidad - EIA Aprobado	Nuevo	1750	-	
ND	Redabast Chile SPA	ENAPAC Distribución Norte (conducción y distribución)	Atacama	En Calificación	Distribución	Hasta 1900	-	
ND	Redabast Chile SPA	ENAPAC Distribución Este (conducción y distribución)	Atacama	En Calificación	Distribución	Hasta 1200	-	
2026	Cramsa	Aguas marítimas	Antofagasta	En Calificación	Distribución	350,000 m3/día	-	510 (****)
2025	Aguas pacifico	Proyecto Aconcagua	Valparaíso	EIA Aprobado		1000 (*****)	-	105

Anexo 2: Tabla completa CMI.

Perspectiva	Objetivo Estratégico	Indicador Asociado	Meta Referencial	Frecuencia de Medición	Responsable	Meta real	Desviación	brechas	Plan de acción
Financiera	Reducir pérdidas económicas por agua fuera de especificación	Costo asociado a m <sup>3</sup> rechazados por fuera de especificación (\$/m <sup>3</sup> no conforme)	≤ 2% del costo semanal o ≤ 2 USD/m <sup>3</sup> no conforme	Semanal	Gerente o superintendente de operaciones	2,5 USD/m <sup>3</sup>	+0,5 USD/m <sup>3</sup>	Control débil en parámetros de rechazo de calidad	Refuerzo en controles de calidad y automatización del rechazo
Financiera	Disminuir el costo de producción mediante mejora del OEE	Costo total de producción por m <sup>3</sup> × (Producción / Tiempo de Carga) × % de aumento OEE	Ahorro ≥ 5% anual sobre el costo base por m <sup>3</sup> tratado	Mensual	Gerente o superintendente de operaciones	3% ahorro	-2% ahorro	Falta de optimización en tiempos de carga y eficiencia operativa	Ajustar turnos y aplicar plan de mantenimiento preventivo
Ciente	Garantizar cumplimiento de parámetros de calidad del agua tratada	% m <sup>3</sup> fuera de especificación / m <sup>3</sup> totales tratados	≤ 3% mensual	Diario	Gerente o superintendente de operaciones	4,2%	1,2%	Fallas en control de calidad en línea y monitoreo	Mejorar muestreo en línea y ajustes de dosificación
Ciente	Asegurar confiabilidad en el suministro continuo hacia procesos mineros	Nº de incidentes de calidad o cortes no programados reportados por el cliente	0 cortes no programados / ≤ 1 incidente por trimestre	Trimestral	Toda la Organización	2 incidentes	+1 incidente	Inconsistencias en procedimientos de operación	Capacitación y simulacros para protocolos de respuesta
Procesos Internos	Mejorar el tiempo planificado de operación	índice de Carga: Tiempo de Carga/ Tiempo Calendario	≥ 85% (valor razonable de carga efectiva sobre calendario)	Semanal	Gerente o superintendente de operaciones	83%	-2%	Tiempos muertos no planificados por cambio de turno o baja coordinación	Revisión de planificación diaria y coordinación operativa entre turnos

<b>Procesos Internos</b>	Aumentar la productividad por hora	índice de productividad: M3/ Tiempo de Carga	≥ 80% (como base para productividad efectiva)	Semana l	Gerente o superintendente de operaciones	78%	-2%	Velocidades de operación subóptimas y tiempo de carga extendido	Optimizar parámetros de operación por turno y capacitar sobre carga eficiente
<b>Procesos Internos</b>	Mejorar la disponibilidad	Tiempo operación / Tiempo de Carga	≥ 95% (alta disponibilidad técnica asociada a operación continua)	Semana l	Gerente o superintendente de mantenimiento	Disponibilidad 89% / MTBF 120 h / MTTR 6 h	-3% / -40 h / +2 h	Altas tasas de fallas y mantenimientos correctivos diferidos	Campaña intensiva de mantenimiento y gestión de repuestos
<b>Procesos Internos</b>	Mejorar el rendimiento operativo de la planta desaladora	% Rendimiento (Tiempo Neto / Tiempo de Operación) – OEE (%)	Rendimiento ≥ 85% / OEE ≥ 75%	Semana l	Gerente o superintendente de operaciones	Rendimiento 80% / OEE 70%	-5% / -5%	Bajas tasas de eficiencia en velocidad y disponibilidad	Análisis de pérdidas operativas y plan de eficiencia semanal
<b>Procesos Internos</b>	Disminuir pérdida de Calidad	% Calidad: (Tiempo Agregando Valor)/ (Tiempo Neto)*100	≥ 90% (TAV/Net Time como indicador de calidad sostenida)	Semana l	Gerente o superintendente de operaciones	88%	-2%	Variaciones en dosificación y parámetros de proceso	Revisión de rutina de parámetros y ajuste de setpoints de calidad
<b>Procesos Internos</b>	Optimizar tiempos de respuesta ante fallas	Tiempo promedio de atención ante eventos críticos (minutos)	≤ 30 minutos desde la detección a la intervención operativa	Diario	Gerente o superintendente de mantenimiento	42 minutos	+12 minutos	Tiempo excesivo en la activación de respuesta a eventos críticos	Instalación de alertas inteligentes y protocolo de reacción inmediata
<b>Aprendizaje y Conocimiento</b>	Fortalecer competencias del equipo técnico y de mantenimiento	% de mantenimientos capacitados – Nº de certificaciones internas por semestre	≥ 90% del personal crítico capacitado / ≥ 2 certificaciones internas por semestre	Semestral	Gerente o superintendente de mantenimiento	75% capacidad / 1 certificación	-15% / -1 certificación	Cobertura insuficiente de programas de formación técnica	Implementar programa de formación técnica con evaluación interna
<b>Aprendizaje y Conocimiento</b>	Mejorar trazabilidad de información y calidad de registros operacionales	Cumplimiento de protocolos de registro – Auditorías sin observaciones	≥ 95% de cumplimiento / ≥ 1 auditoría trimestral sin observaciones críticas	Trimestral	Gerente o superintendente de operaciones	90% / 1 auditoría con observaciones	-5% / auditoría con observaciones	Débil cumplimiento en trazabilidad y evidencias operativas	Auditorías internas periódicas y formación en normativas