



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

**“Propuesta de Sistema de Tratamiento para el Uso de Agua  
de Mar en Procesos Industriales Costeros”**

Trabajo de Titulación para optar al Título de  
Ingeniero Universitario de EJECUCIÓN EN  
GESTIÓN Y CONTROL AMBIENTAL.

Alumno:  
Ignacio Troncoso Martinez

Profesor Guía:  
Juan Pablo Inostroza.



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

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: Propuesta de Sistema de Tratamiento Para el Uso de Agua de Mar en Procesos Industriales Costeros

Nombre del candidato(a): Ignacio Nicolas Troncoso Martinez

Carrera / Grado: Ingeniería de Ejecución en Gestión y Control Ambiental

Campus: Rey Balduino de Bélgica Departamento: Química y Medio Ambiente

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

Yo, Juan Pablo Inostroza Saldías, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

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

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

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

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

---

---

---

### 4.- FIRMAS

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

Fecha: 25-02-2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 25/02/2026

Firma: ITroncoso



## Resumen

El presente informe tiene como propósito principal realizar un análisis bibliográfico comparativo orientado a la propuesta de implementación de un sistema de tratamiento de agua de mar para su utilización en procesos de enfriamiento en instalaciones industriales ubicadas en zonas costeras. En este contexto, el empleo de agua marina en operaciones industriales se considera una alternativa viable, especialmente en sistemas de refrigeración. No obstante, esta práctica enfrenta retos técnicos y ambientales derivados de su elevada salinidad y la presencia de sólidos, factores que pueden ocasionar corrosión, incrustaciones y bioincrustación en los equipos, afectando la eficiencia operativa y generando impactos sobre el ecosistema marino.

El objetivo central de este estudio es plantear un sistema integral de tratamiento que optimice las operaciones industriales, disminuya la dependencia de fuentes de agua dulce y reduzca los impactos ambientales asociados. Para ello, se llevó a cabo un análisis bibliográfico y comparativo de tecnologías disponibles, un diagnóstico ambiental sobre el uso de agua marina y una evaluación de las ventajas y desventajas económicas y ambientales de cada alternativa. Asimismo, se consideraron propuestas de mejora basadas en la normativa chilena vigente (D.S. 90/2000) y en estándares internacionales como la Clean Water Act y el programa NPDES de Estados Unidos.

Las tecnologías revisadas incluyen cribado para la remoción de sólidos gruesos, filtración multimedia para disminuir la turbidez, procesos de coagulación y floculación para eliminar partículas coloidales, ajuste de pH y alcalinidad para prevenir corrosión e incrustaciones, dosificación de inhibidores para proteger los equipos y el uso de torres de enfriamiento para disipar el calor antes de la descarga. Cada etapa contribuye a mejorar la calidad del agua y garantizar la eficiencia del sistema, aunque implica costos operativos y riesgos ambientales que deben gestionarse adecuadamente.

Entre los principales impactos ambientales identificados se encuentran la contaminación térmica por descargas a altas temperaturas, la liberación accidental de productos químicos como biocidas e inhibidores y la afectación de organismos marinos por la captación y retorno de agua sin control. Para mitigar estos efectos, se proponen medidas como reforzar los límites térmicos y químicos en la normativa chilena, implementar tecnologías de captación de bajo impacto y tomas subterráneas, y establecer monitoreo continuo mediante sensores en línea y telemetría, asegurando transparencia en los datos y un mayor control al medio marino.



## Índice de contenido

▪ Índice de figuras .....	2
▪ Índice de tablas .....	2
▪ Índice de gráficos .....	2
▪ Índice de abreviatura .....	3
▪ Introducción .....	4
▪ Objetivo general .....	5
▪ Objetivo Específico .....	5
▪ Alcance y limitaciones .....	5
▪ Metodología .....	5
▪ Resultados .....	5
▪ Sistemas de refrigeración abiertos .....	6
▪ Composición del agua salada .....	7
▪ Sales que afectan a la industria .....	8
▪ Diagnóstico ambiental del uso de agua de mar en industrias costeras .....	9
▪ Análisis de los sistemas de tratamiento de agua salada .....	10
▪ Cribado .....	10
▪ Filtración multimedia .....	11
▪ Coagulación y floculación .....	12
▪ Ajuste de pH y alcalinidad .....	13
▪ Dosificación de inhibidores de corrosión .....	13
▪ Torres de enfriamiento .....	14
▪ Fortalezas y debilidades ambientales y económicas inherentes a cada tecnología de tratamiento aplicable. ....	16
▪ Propuestas de mejora a partir de experiencias internacionales o normativas ambientales vigentes en Chile. ....	26
▪ Propuestas de Mejora Tecnológica .....	29
▪ Resultados .....	31
▪ Conclusión .....	33
▪ Referencias .....	34
▪ Anexos .....	34



## Índice de Figuras

- Figura N.º 1 “Sistema Cribado” (Tratamiento de Agua - Syner Tech SAS. (2015) ..... 10
- Figura N.º 2 “Sistema Filtración Multimedia” (El sistema de filtro multimedia reduce el nivel de SDI y TSS. (2021)..... 11
- Figura N.º 3 “Sistema de Coagulación y floculación” (ResearchGate) ..... 12
- Figura N.º 4 “Torre de enfriamiento de tiro natural” (Torre de Enfriamiento de Agua. (2022, September). ..... 15
- Figura N.º 5 “Torre de enfriamiento de tiro inducido” (Torre de Enfriamiento de Agua. (2022,September)..... 15
- Figura N.º 6 “Torre de enfriamiento de tiro forzado” (Torre de Enfriamiento de Agua. (2022,September)..... 16

## Índice de Tablas

- Tabla N.º 1 “Composición de sales en agua de mar” (Elaboración propia) ..... 7
- Tabla N.º 2 “Sales que más afectan en la industria” (Elaboración propia) ..... 8
- Tabla N.º 3 “Límite máximo permitido Temperatura en decreto supremo 90” (Elaboración propia) ..... 9
- Tabla N.º 4 “Composición sistema de cribado” (Tratamiento de Agua - Syner Tech SAS. (2015)..... 10
- Tabla N.º 5 “Tipos de filtros” (Elaboración propia) ..... 11
- Tabla N.º 6 “Resumen fortalezas y debilidades ambientales y económicas” (Elaboración propia) ..... 25
- Tabla N.º 7 “Comparación Base legal EEUU y Chile” (Elaboración Propia) ..... 31

## Índice de gráficos

- Gráfico N.º 1 “Composición de sales en agua de mar” (Elaboración propia) ..... 7



## Índice de abreviatura

<b>HVAC</b>	(Heating, Ventilation, and Air Conditioning,)
<b>PVC</b>	(Policloruro de Vinilo)
<b>CAPEX</b>	(Gastos de capital)
<b>OPEX.</b>	(Gastos operativos)
<b>DIRECTEMAR</b>	(Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante)
<b>NPDES</b>	(National Pollutant Discharge Elimination System)
<b>WET</b>	(Whole Effluent Toxicity)
<b>SMA</b>	(Superintendencia del Medio Ambiente)
<b>SCADA</b>	(Supervisory Control and Data Acquisition)
<b>D.S. 90/2000</b>	(Decreto supremo 90)
<b>SEIA</b>	(Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental)
<b>RPM</b>	(Programa de monitoreo)
<b>CWA</b>	(Clean wáter act)

## Introducción

El agua es indispensable tanto para los seres vivos como para el ecosistema. No solo ayuda a regular el clima, influyendo en la distribución de la temperatura y la humedad, sino que también es vital para la fotosíntesis, el proceso por el cual las plantas producen su propio alimento y obtienen nutrientes del suelo. Además, es un recurso crucial para la agricultura y la ganadería, actividades que dependen directamente del riego.

Aunque el agua dulce es un recurso renovable que se forma mediante el ciclo hidrológico, su distribución en el planeta no es uniforme debido a condiciones fisiográficas. En contraste, la gran mayoría del agua disponible es salada y su utilización en procesos industriales requiere tratamientos complejos y costosos, ya que no puede utilizarse directamente.

Frente a esta situación, resulta esencial buscar identificar soluciones eficaces que permitan un mayor aprovechamiento del agua dulce. Asimismo, resulta clave evaluar la posibilidad de la incorporación de agua salada mediante tecnologías avanzadas, como la desalinización, para emplearla en procesos que lo requieran. Esta alternativa se presenta como una opción factible para múltiples usos en el sector industrial.

En los últimos años, el incremento en la demanda hídrica por parte de las industrias ha impulsado la búsqueda de soluciones sostenibles y eficientes para la operación, especialmente aquellas ubicadas en zonas costeras. En este contexto, se ha comenzado a utilizar agua de mar en diversos procesos industriales, aprovechando sus propiedades físicas que benefician ciertas operaciones. Para ello, es necesario implementar sistemas de tratamiento de agua marina que garanticen el cumplimiento de los estándares de calidad requeridos. Esto contribuye a prolongar la vida útil de los equipos, mejorar la eficiencia operativa y disminuir los costos de mantenimiento.

Sin embargo, el agua de mar presenta desafíos importantes debido a su elevada salinidad y la presencia de sólidos en suspensión, lo que la hace inapropiada para su uso directo en procesos industriales que exigen altos niveles de pureza, como los ciclos de generación de vapor o los sistemas de refrigeración de circuito cerrado. La ausencia de un tratamiento adecuado puede ocasionar incrustaciones, corrosión y bioincrustación en los equipos, afectando negativamente la eficiencia operativa, aumentando los costos de mantenimiento y reduciendo la vida útil de los activos. Por lo tanto, se plantea la necesidad de desarrollar una estrategia integral que no solo minimice el impacto ambiental de la descarga de agua, sino que también optimice su aprovechamiento dentro de las operaciones industriales.

## Objetivo general

Proponer un sistema de tratamiento para el uso de agua de mar en procesos industriales costeros, buscando optimizar las operaciones de las empresas y reducir significativamente su dependencia de fuentes de agua dulce.

## Objetivos específicos

- 1) Analizar las tecnologías de tratamiento disponibles para su aplicación.
- 2) Comparar fortalezas y debilidades ambientales y económicas inherentes a cada tecnología de tratamiento aplicable.
- 3) Propuestas de mejora a partir de experiencias internacionales o normativas ambientales vigentes en Chile.

## Alcance y limitaciones

El alcance de este proyecto es un estudio bibliográfico comparativo que da lugar a una propuesta de implementación de un sistema de tratamiento de agua de mar diseñado para su uso en sistemas de enfriamiento de empresas al borde costero. Para garantizar que el agua tratada cumpla con los estándares de calidad requeridos para los procesos, prolongando la vida útil de los equipos e instalaciones, como también la mejora y la eficiencia operativa, disminuyendo su impacto ambiental.

## Metodología

- ❖ Recopilación de información documentada y material periodístico del tema.
- ❖ Análisis de tecnología de los sistemas de tratamiento de agua salada a disposición.
- ❖ Identificación de los parámetros críticos para un funcionamiento óptimo.
- ❖ Realizar un diagnóstico de la utilización de recursos y los procesos operativos internos, y formular una propuesta de mejora que garantice una utilización más eficiente, económica y ambientalmente viable de los mismos.

## Resultados

Se ha determinado que los resultados se derivarán directamente de la información recabada en las etapas iniciales del proceso. En caso de requerirse alguna adecuación metodológica o una variación estratégica, esta acción será debidamente notificada y consignada en apego a los protocolos instituidos para la conservación de la trazabilidad y la solidez del estudio.

## 1) Sistemas de refrigeración abiertos

Los sistemas de refrigeración abiertos son una solución térmica que mantiene contacto directo con la atmósfera, ofreciendo una alternativa eficiente para disipar calor en instalaciones industriales. Este tipo de sistemas aprovecha la disponibilidad del recurso marino y sus propiedades térmicas para reducir la temperatura de equipos y procesos, evitando el consumo excesivo de agua dulce. Para su correcto funcionamiento, se requiere una fuente abundante de agua, que puede provenir del mar, ríos, lagos o pozos.

En estos sistemas, es necesario reponer continuamente el agua que se pierde por evaporación o por arrastre del viento en las torres de enfriamiento. Los circuitos abiertos permiten que el agua circule directamente desde la fuente hacia los intercambiadores de calor y luego regrese al medio, lo que simplifica la operación y reduce costos asociados al almacenamiento.

No obstante, su implementación exige considerar factores críticos como la salinidad, la presencia de sólidos suspendidos y organismos marinos, que pueden provocar incrustaciones, corrosión y bioincrustación en los equipos. Al estar expuestos al ambiente, estos circuitos emplean un flujo continuo para realizar el enfriamiento. En nuestro proyecto, se utiliza agua de mar que ingresa al sistema, absorbe el calor del proceso, enfría los equipos y posteriormente se devuelve a su fuente original. Este tipo de sistema se aplica comúnmente en instalaciones industriales que requieren una disipación eficiente de calor, como lo son en industrias como:

- Enfriamientos de maquinaria industrial como turbinas, compresoras, generadores.
- Plantas termoeléctricas y refinерías
- Sistemas de HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) grandes.
- Procesos químicos que requieren disipación de calor

El uso de agua de mar en sistemas de refrigeración ofrece beneficios significativos, como una amplia disponibilidad del recurso hídrico y una excelente capacidad para absorber calor. Sin embargo, también presenta importantes desafíos, como lo son:

- Corrosión: Debido a su alto contenido de sales, el agua de mar puede provocar un desgaste acelerado en los materiales del sistema.
- Incrustaciones: La presencia de organismos vivos como larvas de peces, algas y bacterias, junto con minerales disueltos, puede generar obstrucciones en las tuberías y disminuir la eficiencia operativa del sistema.

## 2) Composición del agua salada

El estudio de la composición del agua de mar corresponde a la proporción de sus componentes, los cuales son siempre aproximadamente los mismos, estas pueden variar según su salinidad donde se puede ver alterada por la dirección de sus flujos, que puede ser tanto horizontal como vertical, y aun en un mismo punto puede sufrir variaciones en las diferentes estaciones del año. Otros factores que pueden hacer modificar la salinidad en un punto en específico son, en primer lugar, la temperatura y, por consiguiente, los aportes de agua dulce que provocan el efecto dilución en este lugar.

El agua de mar está compuesta por un 96,5% de agua y un 3,5% de sales minerales, las cuales se disocian en iones. Al hablar de la salinidad de los mares, se ha establecido un promedio de 35 gramos por cada litro de agua. Estos 35 gramos constituyen su 100% de sales presentes, los cuales tienen dos grandes elementos: el cloruro con un 54,3% (19 gramos) y el sodio con 30,2% (10,57 gramos), seguido del sulfato 7,6% (2,66 gramos), magnesio 3,7% (1,3 gramos), calcio 1,2% (0,42 gramos), potasio 1,1% (0,38 gramos) y otros elementos con 1,9% (0,66 gramos).

Estas sales son fundamentales para mantener los equilibrios fisicoquímicos y los procesos bioquímicos en el ecosistema marino. Esa concentración total se denomina salinidad, que suele expresarse en ppm.

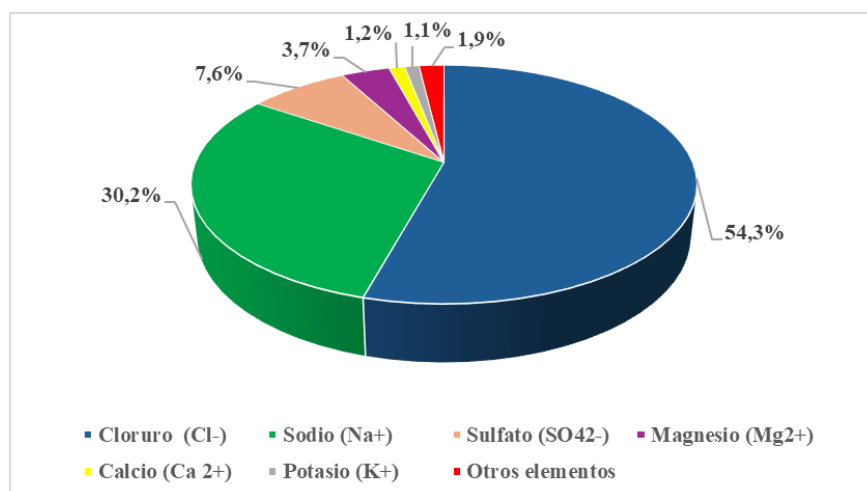


Gráfico N°1 “Composición de sales en agua de mar” (Elaboración propia)

Sales Minerales	Gramos (g)	%
Cloruro (Cl-)	19	54,3
Sodio (Na+)	10,57	30,2
Sulfato (SO42-)	2,66	7,6
Magnesio (Mg2+)	1,3	3,7
Calcio (Ca 2+)	0,42	1,2
Potasio (K+)	0,38	1,1
Otros elementos	0,66	1,9

Tabla N°1 “Composición de sales en agua de mar” (Elaboración propia)

## 2.1) Sales que afectan a la industria

Las sales presentes en el agua de mar generan impactos significativos en los sistemas de refrigeración industrial, ya que forman enlaces iónicos que aceleran los procesos de corrosión en tuberías, bombas, estructuras metálicas y otros equipos, lo que conlleva un aumento en los costos de mantenimiento. Además, estas sales contribuyen a la formación de incrustaciones (scaling), afectando negativamente la eficiencia del sistema, disminuyendo el flujo y la capacidad de transferencia de calor, elevando los gastos operativos y pudiendo incluso provocar fallos en los equipos.

Las sales que más afectan son las siguientes:

Sales presentes	Problemas
Cloruro de sodio (NaCl)	Acelera los procesos de corrosión en metales bajo condiciones de alta temperatura y exposición al oxígeno.
Sulfato de magnesio (MgSO <sub>4</sub> ) y sulfato de calcio (CaSO <sub>4</sub> )	Favorece la formación de incrustaciones en intercambiadores de calor y tuberías, disminuyendo la eficiencia térmica.
Bicarbonato de calcio (Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	Genera incrustaciones en superficies metálicas al aumentar la temperatura del agua.
Iones de magnesio (Mg <sup>2+</sup> ) y calcio (Ca <sup>2+</sup> )	Contribuyen al aumento de la dureza del agua, lo que facilita la acumulación de compuestos sólidos.
Cloruros y bromuros	El aumento en la conductividad eléctrica del agua favorece la corrosión galvánica, un proceso electroquímico que se produce cuando metales distintos están en contacto directo en un medio conductor como el agua de mar, generando una corriente que acelera la degradación del metal menos noble.

Tabla N° 2 “Sales que más afectan en la industria” (Elaboración propia)

### 3) Diagnóstico ambiental del uso de agua de mar en industrias costeras

El uso de agua de mar para refrigeración es común en centrales termoeléctricas, plantas industriales y minería costera, debido a la escasez de agua dulce y la ubicación estratégica cerca del litoral. Las industrias emplean agua de mar en sus operaciones, lo que conlleva uno de los principales impactos ambientales: la contaminación térmica sobre el medio marino ocasionado por las descargas a elevada temperatura. Rigiéndose por el Decreto Supremo 90/2000, esta es la norma de emisión para la regulación de contaminantes en descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Con el principal objetivo de proteger las aguas marinas y continentales superficiales de la contaminación mediante el control de los residuos líquidos que se vierten en ellas. Los límites máximos de temperatura para la descarga de residuos líquidos dependen del tipo de cuerpo receptor. Si hablamos de aguas fluviales (Ríos), tiene como límite máximo permitido 35°C, para aguas lacustres (Lagos y lagunas), 30°C como límite máximo permitido y para aguas marinas, el decreto supremo 90/2000 establece límites específicos según la ubicación (Fuera o dentro de la zona de protección litoral), pero en general el valor referencial es de 35°C como límite máximo permitido para descargas en zonas costeras.

Además, el uso de agua de mar en sistemas de refrigeración abiertos presenta varios problemas ambientales. Estas aguas son devueltas al mar con unas propiedades físico-químicas distintas a las originales. Por otro lado, su temperatura es más elevada que la del agua del medio receptor, llegando a registrarse un salto térmico de entre 5°C hasta 10 °C, afectando la solubilidad del oxígeno y la fisiología de especies marinas. Además, las aguas de refrigeración llevan una cantidad residual de biocida, principalmente hipoclorito, adicionado para evitar las deposiciones de fouling y mantener limpio el circuito de refrigeración: estos compuestos pueden ser tóxicos para fitoplancton, zooplancton y macrofauna. Por tanto, el vertido de las aguas de refrigeración tendrá asociada tanto una contaminación térmica como química que, por el gran volumen de estas descargas, pueden producir importantes efectos perjudiciales sobre el medio, afectando así directamente a uno de los Objetivos de desarrollo sostenible, correspondiente al 14, donde sus principales metas incluyen reducir la contaminación marina y la acidificación de los océanos, poner fin a la pesca ilegal y excesiva, y conservar al menos el 10% de las zonas costeras y marinas. Aumentando la fiscalización y el uso de tecnología apropiada.

<b>Decreto Supremo 90</b>	<b>Límite máximo permitido (°C)</b>
Aguas fluviales	35 °C
Aguas lacustres	30 °C
Aguas marinas	Valor referencial 35 °C

Tabla N° 3 “Límite máximo permitido Temperatura en decreto supremo 90/2000” (Elaboración propia)

#### 4) Análisis de los sistemas de tratamiento de agua salada

En los últimos años, las tecnologías vinculadas a los sistemas de tratamiento han ido evolucionando significativamente, incorporando innovaciones que buscan mejorar la eficiencia energética, minimizar el impacto ambiental y optimizar tanto los costos operativos como los de mantenimiento. Este estudio tiene como objetivo analizar las principales soluciones empleadas en el pretratamiento del agua, considerando sus fundamentos técnicos y su aplicación en el sector industrial.

Una vez que el agua de mar es captada, esta inicia un recorrido por una serie de tecnologías que va mejorando la calidad del recurso por cada etapa que pasa. Este tratamiento comienza con la etapa de:

##### Cribado

El cribado es el proceso principal luego de la captación del recurso hídrico; es la operación encargada de separar el material grueso del agua pasando por una criba o rejilla. El sistema de rejilla es el más utilizado para remover el contaminante grueso; es esencial en el tratamiento, ya que consiste en la eliminación de sólidos de gran tamaño y residuos de las aguas entrantes. Ayudando a proteger los equipos y procesos posteriores contra daños u obstrucciones.

Esta etapa está compuesta por barreras físicas que retienen los sólidos; principalmente se usan barreras paralelas con un espacio entre 2 cm y 5 cm para capturar desechos como plásticos y residuos de mayor tamaño para luego seguir con tamices finos que presentan aberturas más pequeñas, como mallas de 0.5 mm. Estas rejillas generalmente se colocan en una cámara o canal que se inclina hacia el flujo del agua, permitiendo que la suciedad y los sólidos queden atrapados en la superficie aguas arriba de las barreras y permite el acceso para la limpieza; esta puede ser manual o mecánica, permitiendo un buen funcionamiento de los procesos de tratamiento posteriores.

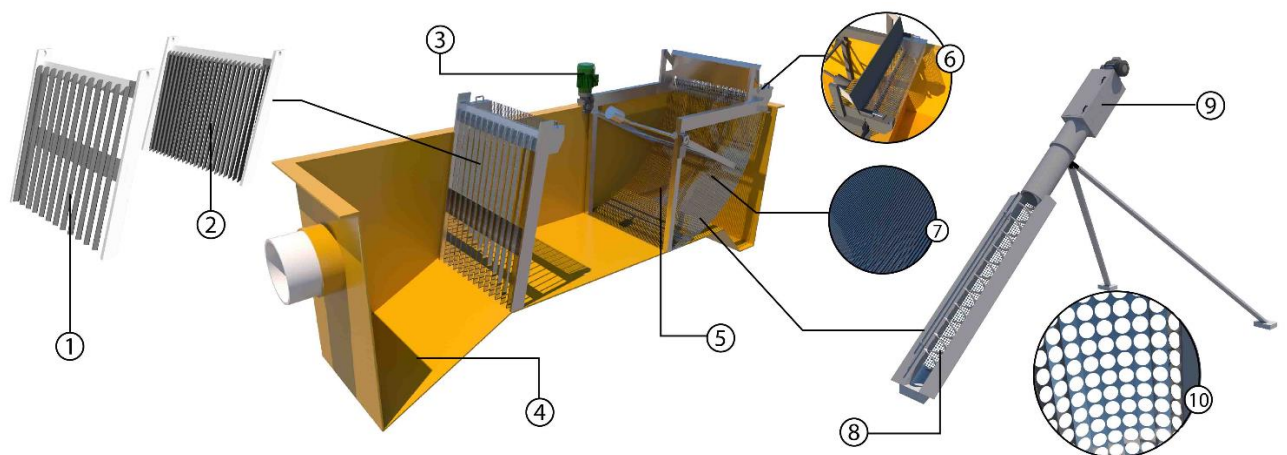


Figura N°1 “Sistema Cribado” (Tratamiento de Agua - Syner Tech SAS. (2015).

1) Reja de cribado grueso	6) Canastilla Colectora
2) Reja de cribado fino	7) Malla coanda lineal
3) Motor reductor	8) Tornillo de arrastre
4) Canal en fibra de vidrio (Prfv)	9) Tamiz tornillo
5) Reja semiautomática	10) Malla Perforada

Tabla N°4 “Composición sistema de cribado” (Tratamiento de Agua - Syner Tech SAS. (2015).

## Filtración Multimedia

Los filtros multimedia reducen los sólidos suspendidos totales en el agua; esta etapa es una excelente manera de eliminar lodos, arcillas, arenilla, materia orgánica, algas, microorganismos y otras impurezas que se encuentran naturalmente en el agua de mar, pero que pueden afectar posteriormente a los procesos.

En general los filtros multimedia se componen de tres capas de material filtrante, estas capas suelen ser de Antracita, Arena de sílice y granate cada uno con propiedades diferentes que son:

Tipo de Filtro	Tamaño de partícula	Función
Antracita	0.8 – 1.2 milímetros	Retiene las partículas mas grandes y reduce la turbidez
Arena de sílice	0.4 – 0.8 milímetros	Filtra partículas finas
Granate	0.3 – 0.15 milímetros	Captura partículas muy pequeñas

Tabla N°5 “Tipos de filtros” (Elaboración propia)



Imagen N° 2 “Sistema Filtración Multimedia” (El sistema de filtro multimedia reduce el nivel de SDI y TSS. (2021)

## Coagulación y Floculación

El proceso de coagulación y floculación tiene como propósito principal la eliminación de turbidez y sólidos suspendidos finos que pueden impactar negativamente a los equipos de tratamiento. Para ello, se agrega un coagulante, el cual puede ser compuestos de aluminio y sales férricas, como lo son el sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) y el cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ).

El tipo de coagulante y la cantidad óptima para su tratamiento se deciden llevando a cabo una prueba de jarra (Jar-test) al agua; esto es un procedimiento de laboratorio para optimizar la coagulación y floculación en el tratamiento de agua de mar que sirve para determinar el tipo y la dosis óptima de coagulante, que esta puede variar debido a los factores propios de esta agua de mar; igualmente, sirve para verificar la eficiencia de remoción de turbidez, color, materia orgánica, además de para encontrar las condiciones ideales de su pH y agitación debida a este proceso.

Una vez encontrada la dosis necesaria, comienza el proceso donde se inyecta un coagulante, neutralizando las partículas con carga negativa que están suspendidas en el agua de mar, reduciendo así las fuerzas que las mantienen separadas. Una vez neutralizada la carga, permite que las partículas coloidales se desestabilicen y comiencen a aglomerarse formando partículas más pequeñas llamadas microfloculos.

Una vez formados los microfloculos comienza el proceso de floculación, el cual consiste en una agitación suave del agua durante un periodo de entre 15 a 30 minutos, promoviendo que las partículas desestabilizadas y los microfloculos se aglomeren en masas más grandes y pesadas, llamadas floculos, para que luego sean eliminados por sedimentación o flotación.

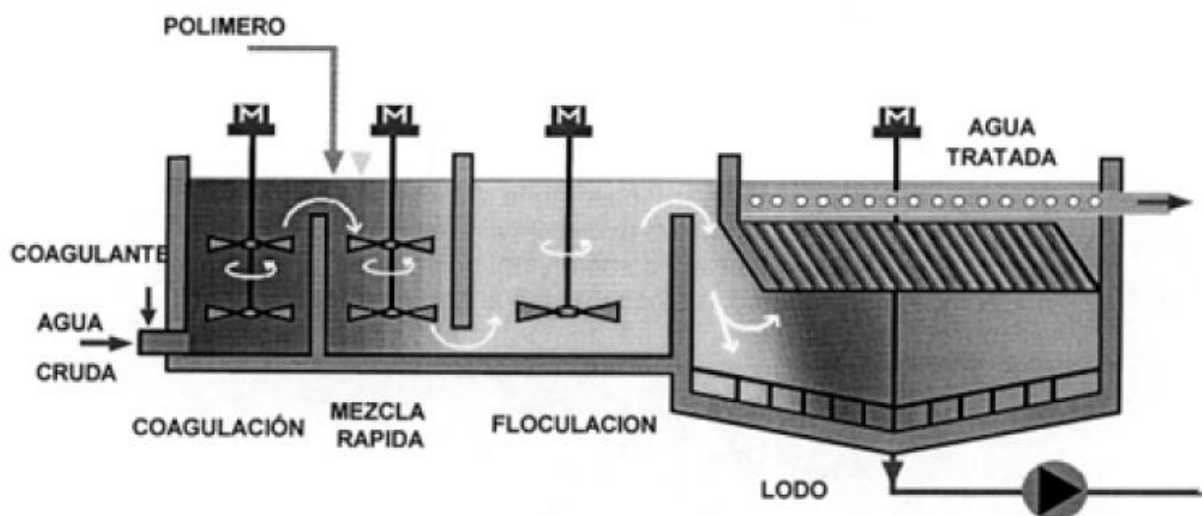


Imagen N° 3 “Sistema de Coagulación y floculación” (ResearchGate)

## Ajuste de pH y alcalinidad

El ajuste del pH y la alcalinidad es una etapa fundamental para mantener la estabilidad química del agua en sistemas de refrigeración. Su objetivo principal es prevenir la corrosión y la formación de incrustaciones. Un pH demasiado bajo vuelve el agua ácida y corrosiva para los metales, mientras que un pH elevado favorece la precipitación de carbonatos, generando depósitos. Mantener el pH dentro de un rango óptimo (generalmente entre 7,0 U de pH y 8,5 U de pH) protege los equipos y asegura la eficiencia del sistema.

La alcalinidad funciona como un amortiguador “buffer” que estabiliza el pH frente a variaciones. Para ajustarla, se regula la concentración de carbonatos y bicarbonatos: puede incrementarse mediante compuestos como carbonato o bicarbonato de sodio, o reducirse mediante purgas y tratamientos químicos. Este equilibrio es esencial para que los inhibidores de corrosión y los biocidas actúen correctamente, ya que su eficacia depende de condiciones químicas estables.

Este proceso se lleva a cabo después de la coagulación y floculación, cuando el agua ya está más limpia y libre de sólidos, lo que facilita el control químico. De esta manera, el agua ingresa al circuito con parámetros adecuados para minimizar daños y prolongar la vida útil del sistema.

## Dosificación de inhibidores de corrosión

La dosificación de inhibidores de corrosión es un tratamiento químico diseñado para proteger las superficies metálicas de los sistemas de refrigeración frente al deterioro causado por el agua. Este problema se agrava en agua de mar, que contiene sales y oxígeno disuelto, favoreciendo reacciones electroquímicas que generan corrosión. Esto puede provocar fugas, pérdida de eficiencia térmica y daños costosos en los equipos.

El mecanismo consiste en añadir compuestos químicos que forman una película protectora sobre el metal, creando una barrera que limita el contacto con agentes corrosivos como oxígeno y cloruros. Existen varios tipos de inhibidores: los anódicos (por ejemplo, fosfatos), que protegen las zonas donde ocurre la oxidación; los catódicos (como el zinc), que actúan en las áreas de reducción; y los orgánicos, que generan capas hidrofóbicas sobre la superficie metálica.

Este proceso es esencial para prolongar la vida útil del equipo, mantener la eficiencia térmica evitando depósitos que disminuyen la transferencia de calor y reducir costos de mantenimiento. La dosificación se realiza después del ajuste de pH y alcalinidad, ya que la efectividad del inhibidor depende de condiciones químicas estables; si el pH no es adecuado, la película protectora no se forma correctamente.

## **Torres de enfriamiento**

Las torres de enfriamiento son dispositivos utilizados para disipar el calor de sistemas industriales o de climatización, transfiriéndolo al aire mediante la evaporación parcial del agua. Se emplean principalmente en procesos donde el agua se calienta al absorber energía térmica.

Las torres de refrigeración reducen la temperatura del agua caliente al pulverizarla en forma de gotas que caen sobre un relleno intercambiador, compuesto por finas láminas de PVC dispuestas estratégicamente. En este proceso, una corriente de aire circula en sentido contrario, favoreciendo la refrigeración. Finalmente, el agua enfriada se recoge en un depósito para su posterior distribución a través del circuito correspondiente.

El aire ingresa por las aberturas inferiores situadas sobre el depósito de agua y atraviesa las torres en dirección ascendente. Esta circulación de aire puede producirse de manera natural en las torres de tiro natural o de forma forzada mediante ventiladores colocados estratégicamente, como se detallará más adelante al describir los distintos tipos de torres existentes.

En una torre de enfriamiento, la transferencia de calor se produce cuando el agua a mayor temperatura interactúa con el aire más frío dentro del relleno, diseñado para maximizar la superficie de contacto y prolongar el tiempo de intercambio térmico. Este proceso favorece la eficiencia del enfriamiento, ya que durante la evaporación una fracción del agua absorbe la energía necesaria del volumen restante, reduciendo su temperatura. De forma aproximada, se evapora un 1 % del caudal por cada 7 °C de disminución térmica. El vapor generado es retenido mediante un separador de gotas, evitando arrastres y asegurando una operación segura y eficiente.

Según su diseño, existen diferentes tipos de torres de enfriamiento. La principal diferencia entre ellas radica en el método utilizado para introducir el aire en la estructura, el cual puede ser mediante tiro natural o de forma forzada a través de ventiladores.

### **Torres de enfriamiento de tiro natural**

El movimiento del aire se genera por la diferencia de densidades entre el aire frío del exterior y el aire húmedo del interior de la torre. Para lograr el tiro requerido, se emplean chimeneas de gran altura. Debido a sus dimensiones, estas torres manejan caudales superiores a 200.000 gpm y son ampliamente utilizadas en plantas termoeléctricas.

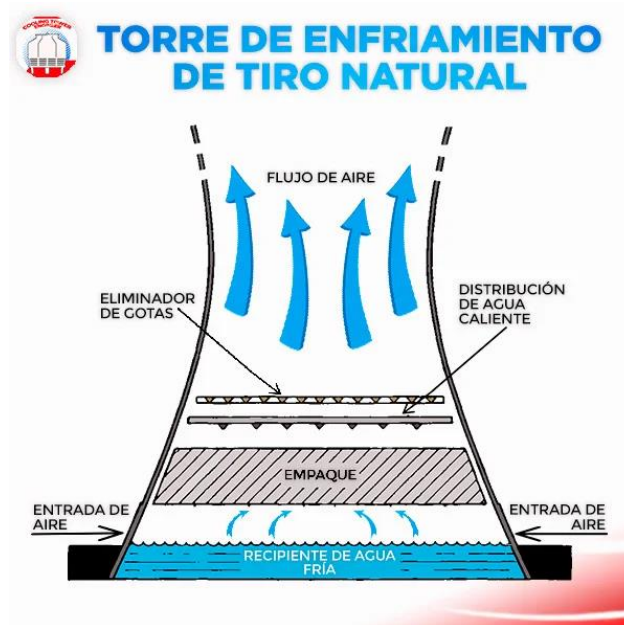


Imagen N.º 4 “Torre de enfriamiento de tiro natural” (Torre de Enfriamiento de Agua. (2022, September).

### Torres de enfriamiento de tiro inducido

En este diseño, el aire es extraído mediante un ventilador ubicado en la parte superior de la torre. Son las más comunes, ya que ofrecen mayor eficiencia en comparación con otros modelos.

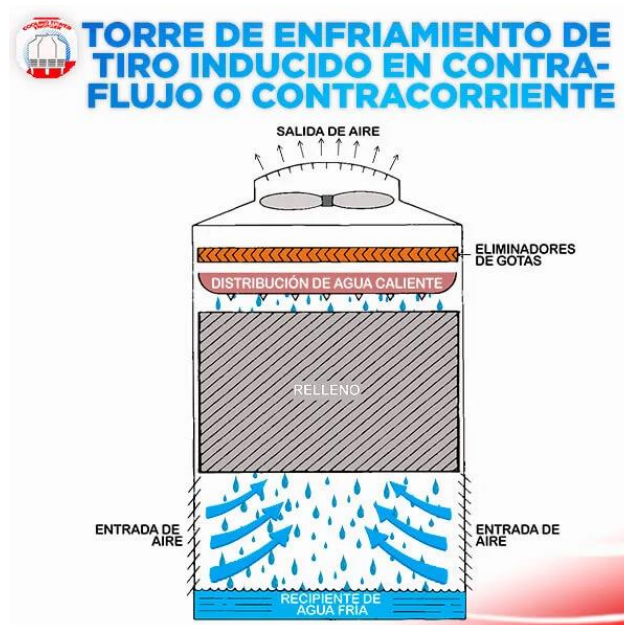


Imagen N.º 5 “Torre de enfriamiento de tiro inducido” (Torre de Enfriamiento de Agua. (2022, September).

### Torres de tiro forzado

En este tipo, el aire se impulsa mediante un ventilador situado en la base y se descarga por la parte superior. Presentan menor eficiencia debido a la baja velocidad de salida del flujo de aire.

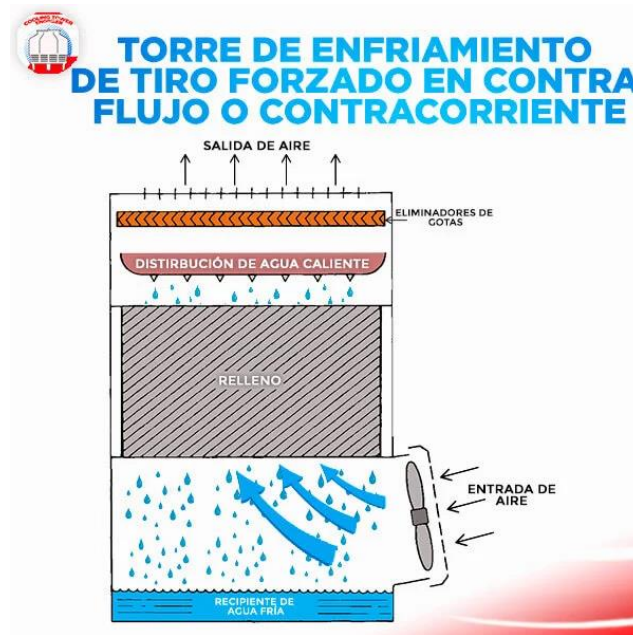


Imagen N.º 6 “Torre de enfriamiento de tiro forzado” (Torre de Enfriamiento de Agua. (2022,September).

## 5) Fortalezas y debilidades ambientales y económicas inherentes a cada tecnología de tratamiento aplicable.

### Cribado

#### Fortalezas Ambientales:

- Protección de ecosistemas: Un cribado eficiente contribuye a la protección de los ecosistemas marinos al evitar que algas, desechos, peces, larvas y plancton ingresen al sistema, reduciendo así su mortalidad en etapas posteriores del proceso.
- Menor uso de químicos: Al retirar los sólidos de mayor tamaño, se disminuye la necesidad de aplicar productos químicos para controlar la formación de bioincrustaciones.
- Reducción de sólidos en el agua de retorno: Se capturan elementos como algas y residuos flotantes, evitando que regresen al mar y generen contaminación visual o física.
- Prevención de obstrucciones y derrames: Mantener el flujo libre de sólidos de gran tamaño reduce el riesgo de averías que podrían ocasionar descargas no controladas al medio marino.

#### Fortalezas Económicas

- Reducción de costos operativos: Se disminuye la necesidad de intervenciones en equipos posteriores como bombas, filtros y membranas.

- Protección de equipos: Previene daños en bombas, intercambiadores y tuberías, lo que reduce los costos de reparación y prolonga la vida útil de los componentes.
- Simplicidad operativa: Diseñada para operar con simplicidad, requiriendo menos personal altamente especializado.
- Escalabilidad: Puede adaptarse a caudales elevados sin necesidad de sistemas complejos, lo que lo convierte en una opción rentable para plantas industriales y centrales eléctricas.

### **Debilidades Ambientales**

- Impacto en organismos marinos: El cribado captura peces, larvas y otros organismos, provocando mortalidad directa y generando un impacto negativo en la biodiversidad local.
- Gestión de residuos sólidos: El material retenido (algas, sedimentos y restos orgánicos) debe ser tratado o dispuesto de forma adecuada; si se devuelve al mar sin control, puede generar alteraciones en el ecosistema.
- Alteración del hábitat: Las estructuras de cribado pueden alterar las corrientes y la dinámica de sedimentos en la zona costera, afectando áreas sensibles del ecosistema.
- Riesgo de contaminación secundaria: El uso de productos químicos para limpiar las rejillas (como biocidas) puede terminar contaminando el agua de retorno.

### **Debilidades Económicas**

- Costos de instalación y mantenimiento: Los sistemas de cribado requieren estructuras resistentes a la corrosión del agua salada, lo que incrementa el costo inicial y las necesidades de mantenimiento.
- El mantenimiento es frecuente debido a la formación de incrustaciones biológicas (biofouling) y la acumulación de sólidos; se requieren limpiezas periódicas, lo que genera costos operativos adicionales.
- Consumo energético: El cribado mecánico, especialmente en sistemas de gran caudal, requiere energía para accionar rejillas y equipos de limpieza, lo que incrementa los costos operativos.
- Interrupciones operativas: Si el sistema de cribado falla por obstrucción o rotura, puede detener el flujo de agua, afectando la producción y generando pérdidas económicas.
- Necesidad de redundancia: Para asegurar la continuidad operativa, se instalan sistemas dobles o alternativos, lo que incrementa la inversión y el espacio requerido.

## Filtración multimedia

### Fortalezas ambientales

- Reducción significativa de sólidos suspendidos y turbidez: Mejora la calidad del agua devuelta al mar, reduciendo el impacto visual y físico sobre el ecosistema.
- Menor uso de químicos en pretratamiento: Al reducir la cantidad de sólidos, se minimiza la aplicación de coagulantes y biocidas, disminuyendo el riesgo de contaminación química.
- Protección contra biofouling: Al eliminar partículas y materia orgánica, se limita la proliferación de organismos en los equipos, evitando descargas contaminantes.
- Tecnología adaptable y sostenible: Puede emplear medios filtrantes naturales como arena o antracita, reduciendo el impacto ambiental asociado a su fabricación y disposición final.

### Fortalezas Económicas

- Alta eficiencia en remoción de sólidos finos: Disminuye la carga de partículas antes de procesos críticos como ósmosis inversa e intercambiadores, reduciendo costos de mantenimiento y prolongando la vida útil de los equipos.
- Menor frecuencia de limpieza en etapas posteriores: Al entregar agua más limpia, se reduce el consumo de productos químicos y la necesidad de paradas para limpieza en los sistemas aguas abajo.
- Operación relativamente estable y automatizable: Puede integrarse con sistemas automáticos de retrolavado, lo que disminuye los costos de mano de obra y facilita la operación.
- Optimización del consumo energético: Aunque requiere bombeo adicional, resulta más eficiente que tecnologías avanzadas de filtración, como las membranas, cuando se trata de grandes caudales.

### Debilidades Ambientales

- Generación de residuos sólidos y químicos: Los medios filtrantes desgastados y los lodos provenientes del retrolavado requieren una disposición adecuada para evitar impactos contaminantes.
- Huella energética mayor que el cribado: Aunque menor que la de las membranas, el bombeo y los procesos de retrolavado incrementan la huella de carbono.
- Impacto en el ecosistema si no se gestiona el efluente: Si el agua de retrolavado se descarga al mar sin tratamiento, puede deteriorar la calidad del agua y afectar a los organismos marinos.

## Debilidades Económicas

- Alta inversión inicial: Requiere la instalación de tanques, válvulas, bombas y medios filtrantes especializados (como arena, antracita y granate), lo que incrementa el costo en comparación con opciones más simples, como el cribado.
- Costos de operación y mantenimiento: requieren retrolavados frecuentes para evitar la saturación, lo que implica un consumo adicional de agua dulce y energía. Además, es necesario reemplazar periódicamente los medios filtrantes, lo que puede representar un gasto considerable.
- Espacio y complejidad: Ocupa más área que sistemas simples y necesita integración con bombas y sistemas de control, lo que incrementa los costos de infraestructura.
- Dependencia de agua dulce para retrolavado: En zonas costeras con escasez de este recurso puede convertirse en un factor económico crítico.

## Coagulación y floculación

### Fortalezas Económicas

- Reducción de carga en etapas posteriores: Reduce la presencia de sólidos suspendidos y materia orgánica, lo que contribuye a disminuir los costos de mantenimiento.
- Optimización del pretratamiento: Facilita el uso de filtros más pequeños y económicos, ya que la coagulación incrementa la eficiencia global del sistema.
- Flexibilidad en grandes caudales: Se trata de una tecnología escalable y relativamente económica para plantas de gran capacidad.

### Fortalezas Ambientales

- Mejora significativa en la calidad del agua: Disminuye la turbidez, los sólidos y los contaminantes orgánicos, evitando su retorno al mar.
- Disminución de biofouling: Al eliminar nutrientes y partículas, se limita la proliferación de organismos en equipos y puntos de descarga.
- Compatibilidad con procesos sostenibles: Puede integrarse con tecnologías que reduzcan el uso de químicos (como coagulantes naturales), disminuyendo el impacto ambiental.
- Menor riesgo de contaminación en el retorno: Al mejorar la calidad del agua tratada, se reduce el impacto sobre los ecosistemas marinos.

## Debilidades Económicas

- Alto costo de productos químicos: Los coagulantes (como sales de aluminio o hierro) y los polímeros implican un gasto continuo, especialmente en sistemas que manejan grandes caudales.
- Costos de operación y control: Requiere una dosificación precisa, monitoreo constante y personal especializado, lo que incrementa los costos operativos.
- Generación de lodos: Su manejo y disposición resultan costosos, ya que requieren transporte, tratamiento y cumplimiento de normativas.
- Infraestructura adicional: Requiere tanques de mezcla, sedimentadores y sistemas de bombeo, lo que incrementa la inversión inicial.

## Debilidades Ambientales

- Impacto por disposición de lodos: Los lodos contienen metales y materia orgánica; si no se gestionan adecuadamente, pueden generar contaminación en suelos y cuerpos de agua.
- Riesgo de contaminación química: Un exceso de coagulantes o polímeros puede llegar al agua de retorno, afectando a los organismos marinos.
- Consumo de agua en limpieza y purga: Los sistemas requieren lavados y purgas periódicas, generando efluentes que deben ser tratados.
- Huella de carbono asociada a químicos: La fabricación y transporte de coagulantes incrementa la huella ambiental del proceso.

## Ajuste de pH y Alcalinidad

### Fortalezas Económicas

- Protección de equipos y reducción de costos de mantenimiento: Mantener el pH y la alcalinidad dentro de rangos adecuados previene corrosión e incrustaciones, prolongando la vida útil de bombas, tuberías y membranas.
- Optimización de procesos posteriores: Un pH controlado mejora la eficiencia en coagulación, floculación y filtración, reduciendo el consumo de productos químicos y energía.
- Prevención de paradas no programadas: Reduce el riesgo de fallos por incrustaciones o corrosión, evitando costos asociados a interrupciones operativas.
- Flexibilidad en grandes caudales: Es una solución escalable y relativamente económica en

comparación con tecnologías más complejas.

### **Fortalezas Ambientales**

- Protección del ecosistema marino: Evita que el agua devuelta al mar presente valores extremos de pH, reduciendo el impacto sobre la fauna y la flora.
- Reducción del uso de químicos en etapas posteriores: Mantener un pH adecuado disminuye la necesidad de coagulantes y dispersantes, reduciendo la carga química total.
- Compatibilidad con métodos sostenibles: Puede aplicarse utilizando CO<sub>2</sub> en lugar de ácidos fuertes, reduciendo riesgos y la huella ambiental.
- Prevención de descargas agresivas: Reduce la liberación de efluentes corrosivos o alcalinos que podrían alterar el equilibrio del ecosistema.

### **Debilidades Económicas**

- Costo continuo de reactivos: El uso de ácidos y bases implica un gasto recurrente, especialmente en plantas que manejan grandes caudales.
- Infraestructura adicional: Se requieren sistemas de dosificación, tanques de almacenamiento y equipos de monitoreo, lo que incrementa la inversión inicial.
- Consumo energético indirecto: El uso de bombas y sistemas de mezcla incrementa la demanda energética, elevando los costos operativos.
- Dependencia de insumos externos: La disponibilidad y el costo de los productos químicos pueden fluctuar, lo que impacta la estabilidad económica del proceso.

### **Debilidades Ambientales**

- Riesgo de sobredosificación: Un error en la dosificación puede provocar descargas con pH extremo, afectando negativamente los ecosistemas marinos.
- Impacto por químicos: El empleo de ácidos y bases concentradas conlleva riesgos de derrames y contaminación si no se gestionan correctamente.
- Generación de subproductos: Cambios abruptos pueden propiciar la formación de sales insolubles que terminan en los efluentes.
- Huella de carbono asociada a reactivos: La fabricación y el transporte de productos químicos aumentan el impacto ambiental del sistema.

## Dosificación de inhibidores de corrosión

### Fortalezas Económicas

- Protección de equipos y reducción de costos de mantenimiento: Los inhibidores extienden la vida útil de tuberías, bombas, intercambiadores y membranas, evitando reparaciones costosas.
- Prevención de paradas no programadas: Reduce fallos por corrosión, disminuyendo las pérdidas ocasionadas por interrupciones en la operación.
- Optimización del diseño del sistema: Facilita la utilización de materiales más económicos (en lugar de aleaciones altamente resistentes), disminuyendo la inversión inicial.
- Ahorro a largo plazo: Aunque requiere un gasto en reactivos, el beneficio por la disminución de daños supera el costo operativo.

### Fortalezas Ambientales

- Reducción de fugas y derrames: Al prevenir perforaciones causadas por corrosión, se disminuye el riesgo de descargas no controladas hacia el mar.
- Menor generación de residuos metálicos: Protege los equipos, disminuyendo la producción de chatarra y desechos industriales.
- Compatibilidad con sistemas cerrados y sostenibles: Los inhibidores permiten conservar la calidad del agua en los circuitos, disminuyendo la necesidad de purgas frecuentes.
- Prevención de contaminación por metales: Al reducir la corrosión, se evita que metales disueltos (como el hierro) lleguen al agua de retorno.

### Debilidades Económicas

- Costo continuo de productos químicos: Los inhibidores requieren dosificación constante, lo que representa un gasto recurrente considerable.
- Dependencia de insumos especializados: Algunos inhibidores son formulaciones específicas para agua de mar, lo que puede incrementar el costo y la complejidad en su adquisición.
- Infraestructura adicional: Se requieren sistemas de dosificación, monitoreo y control, lo que incrementa la inversión inicial.
- Posible incompatibilidad con otros tratamientos: Algunos inhibidores pueden interferir con

procesos como la coagulación o la filtración, generando ajustes adicionales y costos extra.

### **Debilidades Ambientales**

- **Riesgo de toxicidad en el medio marino:** Si el agua tratada se devuelve al mar sin control, los inhibidores pueden afectar organismos acuáticos.
- **Acumulación química:** El uso prolongado puede generar residuos químicos en efluentes, aumentando la carga contaminante.
- **Huella de carbono asociada a producción y transporte:** La fabricación y distribución de inhibidores contribuye al impacto ambiental global.
- **Gestión de derrames y almacenamiento:** Los inhibidores requieren manejo seguro; un derrame puede contaminar suelos y aguas cercanas.

### **Torres de enfriamiento**

#### **Fortalezas Económicas**

- **Reducción de costos energéticos:** Las torres de enfriamiento permiten disipar calor de manera eficiente, evitando el uso de sistemas de enfriamiento más costosos como chillers eléctricos.
- **Menor inversión en sistemas cerrados:** Al usar agua de mar, se reduce la necesidad de circuitos cerrados con fluidos especiales, lo que disminuye costos iniciales.
- **Reducción de costos en tratamiento térmico:** Al disipar calor de manera eficiente, se evita la necesidad de sistemas costosos de refrigeración mecánica.
- **Larga vida útil con mantenimiento adecuado:** Las torres son equipos robustos que, con buen mantenimiento, pueden operar por décadas, amortizando la inversión inicial.

#### **Fortalezas Ambientales**

- **Disminución del consumo de agua dulce:** Al usar agua de mar, se preservan fuentes de agua potable, contribuyendo a la sostenibilidad hídrica.
- **Reducción del impacto térmico directo en el mar:** Las torres permiten enfriar el agua antes de devolverla, evitando choques térmicos que afectan ecosistemas marinos.
- **Menor huella de carbono comparada con sistemas mecánicos:** El enfriamiento por

evaporación es más eficiente energéticamente que sistemas de refrigeración por compresión.

- Posibilidad de integración con tecnologías limpias: Se pueden combinar con sistemas de recuperación de calor y optimización energética, reduciendo emisiones indirectas.

### Debilidades Económicas

- Costos de mantenimiento elevados: El agua de mar contiene sales y minerales que generan incrustaciones y corrosión en los materiales, lo que obliga a usar aleaciones resistentes (acero inoxidable, titanio) y sistemas anticorrosivos, aumentando el **CAPEX** y **OPEX**.
- Tratamiento químico costoso: Se requieren inhibidores de corrosión, dispersantes y biocidas para controlar incrustaciones y crecimiento biológico (algas, bacterias), lo que incrementa el gasto operativo.
- Mayor consumo energético: El agua de mar tiene mayor densidad y salinidad, lo que puede reducir la eficiencia térmica y aumentar la potencia de bombeo.
- Vida útil reducida de equipos: La agresividad del agua salada acelera el desgaste, aumentando la frecuencia de reemplazo de componentes.

### Debilidades Ambientales

- Impacto térmico en el ecosistema marino: Si el agua se devuelve al mar con temperatura elevada, puede alterar la biodiversidad local, afectando peces y organismos sensibles.
- Descarga de químicos al mar: Los productos usados para controlar incrustaciones y biofouling pueden ser tóxicos para la fauna marina si no se neutralizan adecuadamente.
- Riesgo de bioinvasión: Las torres pueden favorecer la proliferación de organismos no deseados que luego se liberan al mar.
- Alteración de salinidad y oxigenación: Aunque menor que el impacto térmico, el proceso puede modificar parámetros físico-químicos del agua en zonas costeras.

A continuación, se presenta una herramienta comparativa diseñada para un análisis sistemático de las opciones tecnológicas disponibles. Su finalidad es documentar las ventajas y desventajas clave de cada solución, con el fin de juzgar su idoneidad, eficacia operativa y cualquier impedimento potencial en el marco de la investigación.

Tecnología	Ventajas Ambientales	Ventajas Económicas	Desventajas Ambientales	Desventajas Económicas
Cribado	Reducción de sólidos en el agua de retorno: Retiene materiales grandes (algas, residuos flotantes), evitando que vuelvan al mar y contribuyan a contaminación visual o física.	Protección de equipos: Evita daños en bombas, intercambiadores y tuberías, reduciendo costos de reparación y prolongando la vida útil de los equipos.	Impacto en organismos marinos: El cribado retiene peces, larvas y otros organismos, causando mortalidad directa y afectando la biodiversidad local.	Costos de instalación y mantenimiento: Los sistemas de cribado requieren estructuras robustas para resistir la corrosión por agua salada, lo que aumenta el costo inicial.
Filtración multimedia	Menor uso de químicos en pretratamiento: Al reducir sólidos, se minimiza la dosis de coagulantes y biocidas, disminuyendo riesgo de contaminación química.	Operación relativamente estable y automatizable: Puede integrarse con sistemas automáticos de retrolavado, reduciendo costos de mano de obra.	Impacto en el ecosistema si no se gestiona el efluente: Si el agua de retrolavado se descarga al mar sin tratamiento, puede alterar la calidad del agua y afectar organismos marinos.	Alta inversión inicial: Requiere tanques, válvulas, bombas y medios filtrantes especializados (arena, antracita, granate), lo que eleva el costo frente a tecnologías más simples como el cribado.
Coagulación y floculación	Flexibilidad en grandes caudales: Es una tecnología escalable y relativamente económica para plantas de gran tamaño.	Menor riesgo de contaminación en el retorno: Al mejorar la calidad del agua tratada, se disminuye el impacto sobre ecosistemas marinos.	Impacto por disposición de lodos: Los lodos contienen metales y materia orgánica; si no se gestionan adecuadamente, pueden contaminar suelos y aguas.	Costos de operación y control: Requiere dosificación precisa, monitoreo constante y personal capacitado, lo que aumenta costos operativos.
Ajuste de pH y alcalinidad	Protección del ecosistema marino: Evita que el agua devuelta al mar tenga pH extremo, reduciendo impactos sobre fauna y flora.	Protección de equipos y reducción de costos de mantenimiento: Mantener el pH y la alcalinidad en rangos adecuados evita corrosión e incrustaciones, prolongando la vida útil de bombas, tuberías y membranas.	Impacto por químicos: El uso de ácidos y bases fuertes implica riesgos de derrames y contaminación si no se manejan adecuadamente.	Infraestructura adicional: Se requieren sistemas de dosificación, tanques de almacenamiento y equipos de monitoreo, lo que aumenta la inversión inicial.
Inhibidores de corrosión	Reducción de fugas y derrames: Al evitar perforaciones por corrosión, se disminuye el riesgo de descargas no controladas al mar.	Optimización del diseño del sistema: Permite usar materiales menos costosos (en lugar de aleaciones muy resistentes), reduciendo inversión inicial.	Riesgo de toxicidad en el medio marino: Si el agua tratada se devuelve al mar sin control, los inhibidores pueden afectar organismos acuáticos.	Dependencia de insumos especializados: Algunos inhibidores son formulaciones específicas para agua de mar, lo que puede aumentar el costo y la complejidad de adquisición.
Torres de enfriamiento	Reducción de costos energéticos: Las torres de enfriamiento permiten disipar calor de manera eficiente, evitando el uso de sistemas de enfriamiento más costosos como chillers eléctricos.	Reducción del impacto térmico directo en el mar: Las torres permiten enfriar el agua antes de devolverla, evitando choques térmicos que afectan ecosistemas marinos.	Impacto térmico en el ecosistema marino: Si el agua se devuelve al mar con temperatura elevada, puede alterar la biodiversidad local, afectando peces y organismos sensibles.	Vida útil reducida de equipos: La agresividad del agua salada acelera el desgaste, aumentando la frecuencia de reemplazo de componentes.

Tabla N.º 6 “Resumen fortaleza y debilidades ambientales y económicas” (Elaboración propia)

## 6) Propuestas de mejora a partir de experiencias internacionales o normativas ambientales vigentes en Chile.

El empleo de agua de mar en sistemas de refrigeración abierta en industrias ubicadas en zonas costeras se presenta como una alternativa para reducir el consumo de agua dulce. Sin embargo, esta práctica implica desafíos significativos relacionados con el impacto ambiental y las tecnologías involucradas, como la posible afectación a la biodiversidad marina debido a la generación de salmuera concentrada y productos químicos. La descarga de esta salmuera en áreas costeras puede modificar las comunidades bentónicas (organismos que habitan en el fondo marino, sobre o dentro del sedimento, como peces planos, crustáceos y corales) y pelágicas (especies que viven en la columna de agua, como peces nadadores (por ejemplo, atunes) y plancton (algas microscópicas y pequeños animales), además de alterar los ciclos biológicos de larvas y organismos asentados. Las propuestas de mejora se sustentan en experiencias internacionales y en el fortalecimiento de la normativa ambiental vigente en Chile.

### Reforzamiento de la Normativa Ambiental Chilena (D.S. N°90/2000)

La normativa ambiental chilena, principalmente el Decreto Supremo N°90/2000, que establece la Norma de Emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, debe ser el punto de partida para las mejoras, ya que esta es la norma que rige al momento de la descarga de las aguas utilizadas en los sistemas de refrigeración.

#### Mayor Restricción en el Aumento de Temperatura

##### A. Límites dependientes de estación y ubicación:

- Ajustar el  $\Delta T$  y la temperatura de salida según región costera y temporada, basándose en la capacidad de asimilación del mar local.
- Durante periodos de menor mezcla térmica (veranos), reducir aún más el  $\Delta T$  permitido.

##### B. Mejores prácticas y diseño tecnológico:

- Exigir uso de emisarios y difusores diseñados para optimizar la dispersión térmica, evitando zonas de acumulación de calor cerca de la descarga.

##### C. Monitoreo térmico continuo en línea:

- Instalar sensores en el punto de descarga y en aguas receptoras a distintas profundidades, continuos en el tiempo.
- Crear estándares de verificación que permitan detectar rápidamente excedentes de temperatura.

#### D. Bioseguimiento y umbrales biológicos:

- Definir parámetros biológicos sensibles al calor (como comportamiento de larvas o diversidad del bentos) que activen respuestas regulatorias (alertas, mitigación, suspensión de descarga).
- Exigir estudios base que relacionen el  $\Delta T$  con efectos ecológicos, usando bioensayos.

#### E. Integración en el SEIA y participación pública:

- Incluir los límites de temperatura como parte central del Estudio de Impacto Ambiental (líneas base, dispersión, análisis de mitigación).
- Habilitar participación ciudadana y monitoreo independiente en zonas sensibles.

### Regulación Específica de Biocidas y Corrosivos:

#### A. Autorización previa y listado positivo de biocidas permitidos:

- Exigir que solo se utilicen biocidas con sustancias activas aprobadas es decir, autorización del producto y aprobación de la sustancia activa antes de su uso en circuitos de refrigeración/torres.
- Alinear el **D.S. 90/2000** con los procedimientos de autorización de productos químicos en jurisdicción marítima que ya aplica **DIRECTEMAR**, incorporando explícitamente biocidas y detergentes usados en operación costera.

#### B. Límites de descarga para biocidas oxidantes (ej. cloro/hipoclorito):

- Establecer límites específicos de cloro residual en el efluente (p. ej., límites horarios promediados con monitoreo continuo), siguiendo la práctica **NPDES** de EE. UU. que pasó de “0,0 mg/L instantáneo” a límites basados en calidad de agua con promedios de 1 hora y control de salinidad/dilución del receptor; requerir planes de descloración operativa (sodio tiosulfato, bisulfito) y sensores en línea.

#### C. Ensayos de toxicidad (**WET**) y bioensayos específicos:

- Complementar la tabla de parámetros del **D.S. 90/2000** con ensayos de toxicidad de efluente total (“**WET**” Whole Effluent Toxicity), práctica estándar en **NPDES** (National Pollutant Discharge Elimination System), para capturar efectos combinados de biocidas y corrosivos; incluir criterios de cumplimiento y acciones correctivas cuando se observen efectos agudos en organismos representativos (plancton, larvas bentónicas)

D. Monitoreo analítico continuo y QA/QC específico:

- Obligar a monitoreo continuo de cloro residual y registro de datos, con planes de control de procesos (setpoints, alarmas, redundancias) y exigencia de métodos analíticos con MDL/RL validados.

E. Implementación escalonada e incentivos:

- Definir plazos progresivos para adoptar límites de biocidas y prácticas de descloración, en línea con la gradualidad que se ha discutido para otros parámetros en revisiones del **D.S. 90/2000**, minimizando impactos y favoreciendo la transición tecnológica.

## Monitoreo y Modelación de Descargas

A. Monitoreo continuo en tiempo real:

- Exigir instalación de sensores en línea para parámetros críticos (temperatura, salinidad, cloro residual, pH, metales) en el punto de descarga.
- Implementar telemetría con transmisión a la **SMA** y alarmas automáticas para excedencias, similar a sistemas **SCADA** industriales.

B. Estándares para calibración y QA/QC:

- Definir protocolos de calibración periódica de sensores y equipos, con trazabilidad y auditorías. Exigir informes QA/QC en cada campaña de monitoreo, alineados con normas ISO 17025 (estándar internacional para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración).

C. Plataforma pública de datos:

- Crear un portal nacional donde se publiquen datos de monitoreo en tiempo real y resultados de modelación, para transparencia y participación ciudadana.
- Integrar alertas tempranas para comunidades costeras y autoridades locales.

D. Inclusión en **SEIA** y **RPM**:

- Obligar que todo proyecto incluya un Plan de Monitoreo y Modelación en su Estudio de Impacto Ambiental, con cronograma, puntos de control y software

utilizado.

- Incorporar estos planes en los Programas de Monitoreo (RPM) fiscalizados por la SMA.

E. Implementación escalonada:

- Establecer plazos para pasar de monitoreo manual a monitoreo continuo automatizado en 3–5 años.

F. Armonización con estándares internacionales:

- Tomar referencia de **EPA NPDES** y directrices europeas que exigen modelación hidrodinámica y monitoreo adaptativo para descargas en cuerpos de agua sensibles.
- Incorporar criterios de zonas de mezcla y límites dinámicos según capacidad de dilución.

## 7) Propuestas de Mejora Tecnológica

Tecnologías de Captación de Bajo Impacto: Las Tecnologías de Captación de Bajo Impacto (Low-Impact Intake Design) son sistemas diseñados para extraer agua de mar minimizando el impacto ambiental, especialmente sobre organismos marinos y la dinámica costera. El objetivo principal es reducir la mortalidad de peces, larvas y plancton, así como evitar alteraciones significativas en el ecosistema.

Se busca que la velocidad del flujo en la superficie de captación sea menor a 0,15 m/s, para permitir que los organismos puedan escapar.

Las Tomas a Baja Velocidad (Low-Velocity Intakes) son otra opción de tecnología de captación diseñada para minimizar el impacto sobre la vida marina durante la captación de agua. Donde se diseñan rejillas de captación con grandes superficies de área libre para que la velocidad de aproximación del agua sea inferior a 0.15 metros por segundo (m/s), igualmente como en las tecnologías de captación de bajo impacto. Este umbral es un estándar en países como EE. UU. (EPA) y la UE, ya que permite que la mayoría de los peces naden lejos de la succión.

Otra propuesta a implementar serían las Tomas Subterráneas (Playas Infiltrantes o Pozos Colectores), las cuales son sistemas de captación indirecta que aprovechan la filtración natural del sedimento costero para extraer agua de mar con bajo impacto ambiental y con gran valoración en los sistemas de refrigeración, ya que reducen sólidos, plancton y organismos sin necesidad de grandes estructuras en el mar o en la industria. Es una práctica común en instalaciones costeras de desalinización en el Mediterráneo y el Golfo Pérsico.

## Comparación entre decreto supremo 90/2000 y Ley de agua limpia (Clean wáter act) (CWA) de Estados Unidos

La Ley de Agua Limpia en Estados Unidos es la principal normativa federal que regula la contaminación del agua, con el objetivo de restaurar y mantener la integridad química, física y biológica de las aguas del país. Establece el marco para regular las descargas de contaminantes en las aguas de EE. UU. y fija estándares de calidad para las aguas superficiales

La ley original fue aprobada en 1948 con el nombre de Federal Water Pollution Control Act, una ley pionera, pero de alcance limitado

En 1972, se hicieron enmiendas profundas, transformándola en la moderna Clean Water Act

Se creó contaminación descontrolada: ríos y lagos colapsados por descargas industriales, agrícolas y aguas residuales.

Ejemplos emblemáticos incluyen el incendio del río Cuyahoga en 1969 y la eutrofización del lago Erie.

La principal problemática es la contaminación térmica al momento de la descarga del recurso utilizado en la planta industrial, la cual la **CWA** prohíbe vertidos de contaminantes sin permiso, donde la sección 316 (a) establece que los límites térmicos pueden tomarse flexibles si el vertido no afecta a una comunidad acuática balanceada. En la sección 316 (b) regula que las estructuras de toma de agua para enfriamiento obligan el uso de la mejor tecnología disponible para minimizar los efectos en la vida acuática.

El **NPDES** (National Pollutant Discharge Elimination System) es un programa creado bajo la Ley de Agua Limpia (Clean Water Act) de Estados Unidos. La cual su función principal es regular las descargas de contaminantes desde fuentes puntuales (como tuberías, plantas industriales o sistemas municipales) hacia aguas superficiales. Es un sistema de permisos que exige que cualquier instalación que descargue contaminantes en aguas navegables obtenga un permiso NPDES. Estos permisos establecen límites específicos de contaminantes, requisitos de monitoreo y reportes para garantizar que las descargas cumplan con los estándares de calidad del agua.

El sistema **NPDES** exige permisos que incluyen límites tecnológicos y basados en la calidad del agua (criterios químicos, biológicos y físicos).

Los permisos térmicos: Se imponen límites, pero el operador puede solicitar una "thermal variance" (variación térmica) con respaldo científico.

Cada permiso debe incluir:

- Límite de temperatura o delta T permitido.
- Monitoreo, reportes y revisión pública del permiso.
- Alternativas térmicas ajustadas mediante estudios técnicos si se busca flexibilidad.

Aspecto	CLEAN WATER ACT (CWA) EEUU	DECRETO SUPREMO 90 (Chile)
Base Legal	Secciones 316 a y b	D.S. 90/2000 (Ley 19300)
Valores Térmicos	Limite definido en permisos adquiridos por NPDES	Limite definido en RPM para cada caso (No hay valor único)
Como funciona	Permiso NPDES con requisitos específicos de temperatura; posibilidad de variación térmica bajo 316(a) con participación pública y estudios además de vigilancia federal y estatal.	Resolución de programa de monitoreo por fuente determinando caracterización y reportes obligatorios periódicos que son fiscalizados por la superintendencia de medio ambiente
Aplicación de tecnología	316(b) exige tecnología disponible de enfriamiento para estructuras de toma de agua	No está regulado específicamente, pero los límites térmicos indirectamente incentivan a la mejor tecnología de enfriamiento y evitar la contaminación térmica.

Tabla N.º 7 “Comparación Base legal EEUU y Chile” (Elaboración Propia)

## 8) Resultados

El análisis realizado determinó que el tren de tratamiento ideal para emplear agua de mar en sistemas abiertos de refrigeración tiene que incluir, consecutivamente, las siguientes operaciones unitarias: cribado para eliminar sólidos gruesos, filtración multimedia para disminuir las partículas finas, coagulación-floculación para desestabilizar y agregar coloides, ajuste del pH y la alcalinidad para controlar la química del agua, dosificación de inhibidores de corrosión con el fin de proteger las superficies metálicas y disipación térmica a través de torres de enfriamiento. Esta configuración garantiza la reducción completa de los riesgos relacionados con la matriz marina, que incluyen sólidos suspendidos, materia orgánica, bioincrustación, salinidad alta, procesos corrosivos e incrustaciones. Esto asegura que el efluente satisfaga los parámetros fisicoquímicos exigidos por la normativa vigente.

Los principales resultados obtenidos por etapa son:

- Cribado: Permite eliminar eficazmente sólidos de gran tamaño y organismos marinos, lo que disminuye la aparición de bioincrustaciones y protege los equipos situados aguas abajo.
- Filtración multimedia: La combinación de antracita, arena de sílice y granate permite reducir de manera notable la turbidez y los sólidos suspendidos, mejorando la calidad del agua para las etapas posteriores del proceso.
- Coagulación-floculación: Mediante la dosificación controlada de coagulantes y una agitación suave, se logra la eliminación de partículas coloidales y materia orgánica disuelta, favoreciendo la formación de flóculos que pueden ser retirados con facilidad.
- Ajuste de pH y alcalinidad: Se regula el equilibrio químico dentro de rangos óptimos (7,0

U de pH –8,5 U de pH), evitando la corrosión y la formación de incrustaciones, y garantizando la acción efectiva de los inhibidores.

- Dosificación de inhibidores de corrosión: La aplicación controlada de inhibidores promueve la formación de películas protectoras que disminuyen la interacción con oxígeno y cloruros, preservando las superficies metálicas.
- Torres de enfriamiento: Las torres de enfriamiento reducen la temperatura del agua antes de su vertido, evitando impactos térmicos en el ecosistema marino. Se considera como referencia operativa que por cada disminución de 7 °C se evapora aproximadamente el 1 % del caudal, complementando el proceso con separadores de gotas para minimizar arrastres.

Respecto al impacto térmico, se ratifica la obligación de cumplir con la normativa chilena (D.S. 90/2000), la cual fija límites de temperatura para descargas en aguas marinas (referencia: 35 °C). Se sugiere implementar emisarios y difusores que favorezcan la dispersión del calor, junto con sistemas de monitoreo en línea para temperatura, salinidad y cloro residual, garantizando trazabilidad y conformidad normativa. Además, se reconoce la necesidad de aplicar procesos de descloración cuando se empleen biocidas oxidantes, evitando efectos tóxicos en el medio receptor.

La comparación con estándares internacionales, como la Clean Water Act y el programa NPDES, revela oportunidades para perfeccionar la normativa, incluyendo la incorporación de límites específicos para biocidas, la implementación de monitoreo telemétrico y la realización de pruebas de toxicidad del efluente total (WET). Estas prácticas contribuirían a fortalecer la gobernanza ambiental y mejorar la transparencia en la gestión de descargas industriales.

En cuanto a la captación, se determina que el diseño de baja velocidad ( $\leq 0,15$  m/s) y el uso de tomas subterráneas mediante playas infiltrantes o pozos colectores constituyen avances tecnológicos relevantes, ya que disminuyen la entrada de biota y sólidos, reducen la mortalidad de organismos y alivian la carga del sistema de tratamiento. Esto se traduce en menores costos de mantenimiento y una mayor eficiencia operativa.

Finalmente, el análisis económico-operacional indica que, aunque el tren de tratamiento requiere una inversión inicial significativa en infraestructura y materiales resistentes, estos costos se compensan con la disminución de paradas no programadas, la extensión de la vida útil de los equipos y la reducción del riesgo de sanciones por incumplimiento normativo. Los riesgos residuales, como la captación de biota, las excedencias térmicas y la toxicidad por productos químicos, pueden mitigarse mediante tecnologías de bajo impacto, monitoreo continuo y planes de contingencia, consolidando la viabilidad técnica y ambiental del uso de agua de mar en sistemas de refrigeración industrial.

## Conclusión

El empleo de agua de mar en procesos industriales ubicados en zonas costeras se presenta como una alternativa estratégica para disminuir la dependencia de fuentes de agua dulce y promover la sostenibilidad hídrica en áreas con alta demanda. Sin embargo, esta práctica conlleva retos técnicos y ambientales que requieren soluciones integrales y un enfoque preventivo.

El análisis realizado responde explícitamente al objetivo general: **“Proponer un sistema de tratamiento para el uso de agua de mar en procesos industriales costeros, buscando optimizar las operaciones de las empresas y reducir significativamente su dependencia de fuentes de agua dulce”** lográndolo mediante el diseño de un tren de tratamiento integral que incluye cribado, filtración multimedia, coagulación-floculación, corrección de pH, dosificación de inhibidores y torres de enfriamiento.

Este diseño une el primer objetivo específico: **“Analizar las tecnologías de tratamiento disponibles para su aplicación”**, junto con el segundo: **“Comparar fortalezas y debilidades ambientales y económicas inherentes a cada tecnología de tratamiento aplicable”**. Donde se desarrolló una matriz comparativa que registra las fortalezas y debilidades de cada tecnología, considerando aspectos ambientales (impacto en ecosistemas, generación de residuos, consumo energético) y económicos (costos de instalación, operación y mantenimiento), lo que permite identificar las alternativas más viables. Este análisis asegura la calidad del agua requerida para los procesos, prolonga la vida útil de los equipos y reduce el consumo de agua dulce, contribuyendo así a la sostenibilidad hídrica y a la reducción de impactos sobre el ecosistema marino.

Desde el punto de vista ambiental, se identifican impactos relevantes como la contaminación térmica por descargas a temperaturas elevadas, la liberación de productos químicos (biocidas e inhibidores) y la afectación de organismos marinos por captación y retorno sin control. Estos efectos pueden alterar la biodiversidad, modificar parámetros fisicoquímicos del agua y generar riesgos para especies bentónicas y pelágicas. Para mitigar estas consecuencias, en el marco del tercer objetivo específico: **“Propuestas de mejora a partir de experiencias internacionales o normativas ambientales vigentes en Chile”**, se sugiere fortalecer la normativa chilena (D.S. 90/2000) incorporando límites más estrictos para temperatura y químicos, implementar tecnologías de captación de bajo impacto, tomas subterráneas y sistemas de monitoreo continuo con telemetría, garantizando transparencia y trazabilidad.

Asimismo, las experiencias internacionales, como las regulaciones de la Clean Water Act y el programa NPDES, aportan lineamientos valiosos para avanzar hacia estándares más exigentes y sostenibles. En síntesis, la viabilidad del uso de agua de mar en la industria depende de la integración de tecnologías eficientes, una gestión ambiental responsable y un marco regulatorio sólido que permita equilibrar la productividad industrial con la protección del medio marino. Solo mediante un enfoque adaptativo y preventivo será posible asegurar la sostenibilidad de esta práctica a largo plazo.

## Referencias

### Anexo

1. **Arrecife, M.** (2020, December 16). Composición del agua de mar. Mi Arrecife. [https://www.miarrecife.digital/post/composici%C3%B3n-del-agua-de-mar#google\\_vignette](https://www.miarrecife.digital/post/composici%C3%B3n-del-agua-de-mar#google_vignette)
2. **CALORYFRIO, I. A.** (2018, August 17). ¿Qué es una torre de refrigeración o enfriamiento? Funcionamiento y seguridad - caloryfrio.com. Www.caloryfrio.com. <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/que-es-torre-de-refrigeracion-enfriamiento-funcionamiento-seguridad.html>
3. **El sistema de filtro multimedia reduce el nivel de SDI y TSS.** (2021). Snowate.com. <https://www.snowate.com/es/systems/pre-filters/multimedia-filter.html>
4. **EPA.** (2024, June 12). Summary of the clean water act. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-water-act>
5. **JMDesign.** (2021, March 17). Pretratamiento de agua de mar en plantas de desalinización. Sigmadaf. <https://sigmadafclarifiers.com/daf-para-la-desalinizacion-del-agua-de-mar/>
6. **José López.** (2025, July 9). Sistema de Refrigeración Industrial: Principio Termodinámico. Inspenet. <https://inspenet.com/articulo/sistema-de-refrigeracion-industrial/>
7. **Nacional, B. del C.** (n.d.). Biblioteca del Congreso Nacional | Ley Chile. Www.bcn.cl/Leychile. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=182637>
8. **Screening in wastewater treatment | EMO France.** (n.d.). Wwww.emo-Water-Sludge-Treatment.com. <https://www.emo-water-sludge-treatment.com/products/screening/>
9. **Torre de Enfriamiento de Agua.** (2022, September). Torre de Enfriamiento de Agua. <https://torredeenfriamientodeagua.com>
10. **Tratamiento de Agua - Syner Tech SAS.** (2015). Syner Tech SAS. <https://www.synertech.com.co/aguas-residuales/canal-de-pretratamiento-de-aguas-residuales>
11. **United States Environmental Protection Agency.** (2019, August 27). National Pollutant Discharge Elimination System (NPDES) | US EPA. US EPA. <https://www.epa.gov/npdes>
12. **Water Filtration: How a Multimedia Filter Works?** (n.d.). J Mark Systems , Grand Rapids MI. <https://www.jmarksystems.com/blog/heres-how-a-multimedia-filter-works>